



Promotion 2008-2009

## Optimisation des micro-ouvrages de lutte contre les coulées d'eaux boueuses par la modélisation

**Delphine Dumas**

Rapport de stage soutenu le 06 juillet 2009 en vue de l'obtention du diplôme de

Master II  
Mention Géosciences, Environnement, Risques  
Spécialité « Risques Technologiques et Naturels. »  
Parcours « Risques Naturels ».

**Structure d'accueil** : Conseil Général du Bas-Rhin, Pole Développement des Territoires, Direction de l'Agriculture, de l'Espace Rural et de l'Environnement, Service Rivières, Antenne de Saverne.

**Maître de Stage** : Franck Hufschmitt, ingénieur Rivières du Service Rivières du Conseil Général du Bas-Rhin.

**Co-maître de stage** : Paul Van Dijk, Dr à l'ARAA. Florence Le Ber, professeur/ingénieur de l'ENGEES

**Correspondant universitaire** : Anne-Véronique Auzet, Professeur, Faculté de Géographie et d'Aménagement

**Membres du Jury** : Prof Dr. Granet M. (EOST)  
Prof. Dr. Auzet A-V. (UDS)  
Dr. Van Dijk P. (ARAA)

**Durée du stage** : 2 février 2009 au 31 juillet 2009



Conseil Général du Bas-Rhin, Services Rivières  
Antenne de Saverne,  
9, quai du Canal  
67 700 Saverne



## Remerciements

*Tout d'abord je tiens à remercier mon maître de stage, Franck Hufschmitt, ingénieur rivières, pour sa confiance et toute l'aide qu'il a pu m'apporter à travers ses connaissances, ses contacts dans le milieu professionnel et pour son soutien durant ce stage.*

*Je tiens également à remercier Paul Van Dijk et Florence Leber mes Co-maître de stage, qui m'ont accompagné et conseillé tout au long de ce stage. Paul Van Dijk, pour la formation et l'aide apportées sur le logiciel LISEM. Son énergie, son optimisme et sa patience ont permis de trouver à chaque problème sa solution. Florence Leber, pour m'avoir apporté ses connaissances et son aide précieuse concernant les arbres de décision.*

*Je tiens à saluer Anne-Véronique Auzet, professeur de l'Université de Strasbourg, pour ses conseils, son suivi pédagogique et les contacts dont elle m'a fait profiter m'apportant une aide tout au long de mon parcours en master.*

*Je suis également très reconnaissante à Michel Batt, Conseiller Agricole à la Chambre d'Agriculture, pour avoir partagé ses connaissances et à Caroline Fischer du service informatique de la Chambre d'Agriculture, qui m'a encadrée pour l'utilisation du logiciel ArcGis.*

*Je tiens à remercier Victor Jetten de l'Université d'Utrecht d'avoir développé le logiciel LISEM afin de mener à bien ce projet et d'avoir répondu présent dès que des difficultés sont survenues lors des simulations.*

*Je tiens à remercier Franck Hufschmitt, Paul Van Dijk, Florence Leber, Julien Vincent et Florence Alderweireld, respectivement technicien rivières et stagiaire de l'antenne de Saverne du Conseil général, pour leurs nombreuses relectures de ce mémoire.*

*Enfin je remercie ceux de l'Antenne de Saverne du Conseil Général du Bas-Rhin, pour leur accueil, leurs conseils et les bons moments de détente passés en leur compagnie.*



# Sommaire

<b>INTRODUCTION</b>	<b>4</b>
<b>Partie I : Cadre de l'étude</b>	
<b>I. Structure d'accueil</b>	<b>6</b>
<b>II. Etat de l'art sur les coulées</b>	<b>6</b>
II.1. Aléa « coulées d'eaux boueuses » et options de lutte	6
II.2. Rôle des fascines	7
II.3. Problématique	8
II.4. Objectifs	8
<b>III. Secteur et moyens d'étude</b>	<b>9</b>
III.1. Secteur d'étude	9
III.2. Bassin versant d'Ettendorf	9
III.3. Outils	10
<b>Partie II : Modélisation Lisem</b>	
<b>I. Introduction</b>	<b>12</b>
<b>II. Données d'entrée du modèle LISEM</b>	<b>12</b>
II.1. Cartes originelles et données pluviométriques	12
II.1.1. Modèle Numérique de Terrain	12
II.1.2. Carte des sols	13
II.1.3. Carte de l'occupation des sols	13
II.1.4. Données pluviométriques	13
II.2. Cartes dérivées du MNT (avec TCRP)	13
II.3. Cartes dérivées de la carte d'occupation des sols et de la carte sol	14
II.4. Cartes des états de surface	15
II.5. Cartes des chemins et routes	15
<b>III. Modélisation des fascines au sein du modèle</b>	<b>15</b>
<b>IV. Evénement du 11 mai 2009</b>	<b>16</b>
IV.1. Pluviométrie	16
IV.2. Efficacité des fascines (observation de terrain)	16
IV.3. Conclusion	17
<b>V. Résultats et Analyses</b>	<b>18</b>
V.1. Indicateur « sensibilité d'apport en sédiment »	18
V.2. Efficacité individuelle des fascines durant l'événement du 11 mai 2009	19
V.3. Efficacité individuelle des fascines d'après les simulations	19
V.4. Remplissage des fascines : modélisation fascine méthode <i>Sedtrap</i>	20
V.5. Efficacité des fascines au sein du bassin versant	21
V.6. Outil d'aide à la décision	23



<b>VI. Etude critique et améliorations à apporter</b>	<b>24</b>
VI.1. Problème de précision du Modèle Numérique de terrain	24
VI.2. Modélisation des fascines	24
VI.3. Précision de l'indicateur	25
<b>VII. Conclusion</b>	<b>25</b>

### Partie III : Modélisation d'un arbre d'aide à la décision

<b>Notations</b>	<b>27</b>
<b>I. Introduction</b>	<b>28</b>
<b>II. Arbre de décision</b>	<b>28</b>
II.1. Notions et types de données	28
II.1.1. Notions	28
II.1.2. types de données	30
II.2. Construction d'un arbre de décision	30
II.2.1. Différentes stratégies de construction d'un arbre de décision	31
II.2.2. Sélection des attributs	32
II.2.2.1. Définitions de l'Entropie et de l'Information Mutuelle	32
II.2.2.1.1. Entropie	32
II.2.2.1.2. Information Mutuelle	33
II.2.2.1.3. Gain d'entropie	34
II.2.3. Exemple	35
II.2.4. Algorithmes d'induction : schéma TDIDT	36
II.2.4.1. Algorithme ID3	36
II.2.4.2. Algorithme C4.5	37
II.2.4.3. Algorithme J48	37
II.2.5. Critères d'arrêt de construction d'un arbre	37
II.2.6. Elagage	37
II.2.6.1. Pré-élagage (stopping)	37
II.2.6.2. Post-élagage	38
II.2.6.3. Décision	38
II.2.7. Classement	38
II.2.8. Conclusion	38
<b>III. Conclusion</b>	<b>39</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b>	<b>40</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>42</b>
<b>Listes des figures et tableaux</b>	<b>44</b>
<b>Annexes</b>	<b>45</b>



# Introduction

Le risque « coulées d'eaux boueuses » est un risque connu de longue date. Cependant, les phénomènes d'érosion des sols se sont accrus en Europe. L'Alsace est une région de France régulièrement touchée par ces phénomènes. Ces dernières années, un public de plus en plus important prend conscience de ce phénomène. Cette prise de conscience est due au fait que les coulées d'eaux boueuses sont de plus en plus fréquentes et qu'elles génèrent de plus en plus de dommages à l'environnement agricole et urbain (*Auzet, 1987*). Le phénomène météorologique est le principal facteur à qui certains scientifiques imputent la responsabilité de cette augmentation. Néanmoins, aucune étude n'a été réalisée pour confirmer ou infirmer cette hypothèse. Le ressenti des acteurs de terrain indique que les orages de printemps sont plus précoces et se produisent ainsi à une période où la couverture végétale est peu voire pas développée sur les cultures de printemps (maïs, betteraves...). Les sols ne sont pas protégés et sont alors plus sensibles à l'érosion. Cependant c'est une conjonction de plusieurs facteurs qui est responsable du risque coulées d'eaux boueuses : météo ; changement des assolements depuis les 30 dernières années vers une dominance de plus en plus forte des cultures d'été (notamment le maïs) en détriment des surfaces en céréales d'hiver » ; diminution sur la même période des bétails et donc avec cela des surfaces fourragères (dont les prairies) ; spécialisation des cultures (moins d'hétérogénéité spatiale) ... Au-delà de l'augmentation de l'aléa, on observe une augmentation de la vulnérabilité. On a pu constater que l'accroissement des déclarations de catastrophes naturelles de type coulées d'eau boueuse est corrélé à une extension en périphérie des communes qui s'est faite au détriment des surfaces tampon. Cette problématique n'est pas encore prise en compte lors des extensions des communes (*entretien avec Auzet A-V, Hufschmitt F. et Parcevicius A.*). La combinaison entre l'aggravation de l'aléa et l'augmentation de la vulnérabilité fait que le risque « coulées d'eaux boueuses » est plus élevé.

L'année passée, une étude d'expérimentation a été menée dans le Bas-Rhin afin d'évaluer le fonctionnement de micro-ouvrages appelés fascines. Ces micro-ouvrages ayant prouvé leur efficacité dans certains départements du nord-ouest de la France et particulièrement en Seine Maritime, peut pas affirmer que leur efficacité sera la même en Alsace. Même si c'est le même ouvrage que l'on place sur le chemin pris par le ruissellement boueux, le contexte climatique, topographique, géomorphologique et culturel de l'Alsace diffère de celui de Seine Maritime. Pour cette raison il a été indispensable de tester si le contexte bas-rhinois se prêtait à la pose des fascines en vue de lutter contre les coulées d'eaux boueuses et d'établir leur efficacité (Parcevicius, 2008). Leur efficacité ont été testée l'année dernière, des questions restent en suspens quant à l'efficacité réelle, au positionnement et au dimensionnement des fascines au sein des bassins versant afin d'optimiser leur action. Ces questions font intervenir des facteurs de type « physique » (taille de parcelle, type de culture, topographie etc...). Le facteur de type « sociologique » (volonté de l'exploitant, sensibilité à la problématique etc...) doit être également pris en compte car il régit en partie les contraintes et les règles de décision dans les procédures d'aménagement. C'est dans ce contexte que ce rapport de stage s'inscrit.

L'objectif de ce stage est de créer un outil d'aide à la décision afin d'optimiser l'action des fascines par le choix de leur positionnement et de leur dimensionnement au sein du bassin versant. L'optimisation des fascines va être étudiée sous l'angle de la modélisation. Deux types de modélisation complémentaires sont envisagés : une modélisation à base physique (LISEM) et une modélisation d'aide à la décision (arbre de décision).

Ce rapport s'articule en trois parties. Dans un premier temps, le contexte de l'étude sur la thématique des coulées d'eaux boueuses est présenté ainsi que la problématique qui en découle. Dans un second temps la méthodologie de la modélisation LISEM est développée puis les résultats des différentes simulations sont exposés et analysés. Une troisième partie est consacrée à la présentation d'un arbre de décision établi à partir des données acquises par la modélisation LISEM et grâce à une campagne de terrain.



# **Partie I**

## **Cadre de l'étude**



## I. Structure d'accueil

L'administration du Conseil Général du Bas-Rhin est composée de cinq Pôles de directions. L'une de ces structures est le Pôle Développement des Territoires (PDT). Une des directions de ce pôle est la Direction Agriculture, Espace Rural et Environnement (DAERE) dans laquelle se trouve l'antenne du Service Rivières (SR) qui m'a accueilli durant mon stage (cf. annexe n°1).

Le Service Rivières opère de diverses manières au sein des bassins versants et couvre essentiellement des missions de gestion des cours d'eau dans le cadre d'opérations groupées. Les rôles principaux de ce service sont de préserver et de restaurer la qualité du milieu physique des cours d'eau ainsi que d'aménager les cours d'eau et de minimiser les risques naturels associés. « Les Antennes du SR ont pour missions d'apporter une assistance technique aux maîtres d'ouvrages pour la définition, la mise en œuvre et le suivi des opérations définies dans le cadre des Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) et des SAGEECE<sup>1</sup> » (d'après [www.cg67.fr](http://www.cg67.fr), février 2009).

Depuis plusieurs années, dans le cadre du SAGEECE de la Zorn, ce service se penche sur la thématique des coulées d'eaux boueuses<sup>2</sup>. Celle-ci a pu voir le jour et se développer grâce à une volonté de la part des élus entre autre. Les actions menées contre l'aléa « coulées d'eaux boueuses » se sont généralisées depuis les événements du mois de mai 2008. Les actions de lutte contre les coulées d'eaux boueuses, étudiées dans ce rapport, s'intègrent dans le cadre du SAGEECE de la Zorn et s'opèrent par la mise en place de micro-ouvrages, les fascines. Ces micro-ouvrages ont été retenus par le Conseil Général du Bas-Rhin comme étant une solution à court terme permettant de réduire l'aléa « coulées d'eaux boueuses ». Ils sont testés depuis près d'un an sur des communes du Bas-Rhin sujettes à ce type de coulées. Le Conseil Général du Bas-Rhin établit des partenariats avec l'ARAA, la Chambre de l'Agriculture, la DDAF et la DDE dans le but de réduire le risque en jouant sur l'aléa et la vulnérabilité.

## II. Etat de l'art sur les coulées

### II.1. Aléa « coulées d'eaux boueuses » et options de lutte

Le phénomène « coulées d'eaux boueuses » –ou plus communément coulées de boue– doit être compris comme étant un écoulement chargé en sédiments, provenant des surfaces agricoles et entraînant des particules de sol vers les habitations en aval (*Le Bissonnais et al., 2002*). Ce terme peut prêter à confusion car le terme « coulée de boue » est également utilisé pour des « déplacements en masse » qui se produisent dans les zones de fortes pentes telles que les montagnes. Dans ce dossier, je vais utiliser le terme « coulée d'eaux boueuses » pour éviter toute confusion.

En Alsace, ce phénomène n'est pas nouveau, les constats de pédologues et d'agronomes ainsi que la présence de dépôts dans certains fonds de vallée et le décapage des sols en haut de versants en témoignent (*Auzet et al., 2005*). Dans le Bas-Rhin les coulées d'eaux boueuses se produisent au printemps lors d'épisodes orageux. Les cultures de printemps (maïs, betteraves, asperges etc...) ainsi que des cultures permanentes telles que le houblon, présentent des sols nus ou avec une couverture végétale très peu développée qui sont ameublés par les travaux de préparation du semis. Ces surfaces

---

<sup>1</sup> Le Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau et Entretien Ecologique des Cours d'Eau à été créé en 1991 par le Conseil Général du Bas-Rhin. C'est un outil spécifique de gestion des cours d'eau cofinancé par le Département et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse. Ce schéma fonctionnel, version non réglementaire des SAGE, permet de fédérer les acteurs autour d'un programme d'actions pluriannuel par bassin versant.

Le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) est créé par la loi sur l'eau du 2 janvier 1992. C'est un document de planification pour un périmètre hydrographique cohérent qui fixe les objectifs et les règles d'une gestion intégrée de l'eau au niveau local. ([www.cg67.fr](http://www.cg67.fr)).

<sup>2</sup> Contrairement au terme « coulée de boues » qui décrit des mouvements de terrain, les coulées d'eaux boueuses sont des « écoulements fluides ou crues turbides à fortes charges en matières en suspension où les matériaux sources correspondent aux sols pédologiques, et où les particules détachées sous l'action des pluies et/ou ruissellement sont entraînées par l'écoulement d'eau de surface, diffus ou concentré dans des rigoles et ravines. » (*Auzet et al., 2005*).



**Figure n°1** : Photos de coulées de boues 11 mai 2009. Source : Conseil Général du Bas-Rhin

sont sensibles à la battance, de ce fait elle se désagrège facilement sous l'action de la pluie et tendent à former une croûte de battance favorisant le ruissellement (cf. figure n°1).

Les trente dernières années ont été marquées par une accentuation des phénomènes de ruissellement et d'érosion, cela s'explique essentiellement par l'homogénéisation des surfaces agricoles et la diminution des obstacles (suppression des chemins enherbés, arasement des haies et talus...). L'homogénéisation des surfaces agricoles accentue le ruissellement car les sédiments qui sont entraînés rencontrent peu d'obstacle qui leur permettrait de se déposer. Vient s'ajouter à cette homogénéisation des cultures, une augmentation de l'imperméabilisation des surfaces avec la croissance urbaine. Cette extension s'est faite généralement en suivant les fonds de vallons, au détriment des zones tampons (vergers et prairies). L'expansion urbaine a largement contribué à l'augmentation de la vulnérabilité et donc des risques (*Auzet A-V et al., 1990*).

Les enjeux menacés par les coulées d'eaux boueuses sont multiples (appauvrissement des sols, perte de rendement, infrastructures en aval, pollution...) et les dégâts engendrent un coût important en termes d'indemnisation et de réparation. Compte tenu des enjeux, la phase préventive et la protection contre les coulées d'eaux boueuses sont donc très importantes. La lutte contre les coulées d'eaux boueuses repose sur quatre principes (*Auzet et al., 1990*) :

- Limiter la production de ruissellement dans les zones émettrices,
- Limiter la concentration du ruissellement dans les zones à risque d'incision,
- Augmenter la résistance à l'arrachement dans les zones sources de sédiment
- Protéger les zones où les inondations et les dépôts intempestifs provoqueraient des dégâts importants.

Il existe deux types de mesures pour lutter contre ces phénomènes :

- Les mesures préventives : modification des cultures (pour une meilleure répartition des cultures), techniques culturales, création de bandes enherbées. Trois thématiques regroupent ces mesures : les techniques culturales sans labour ; l'orientation des cultures selon les courbes de niveau et l'alternance des cultures ; l'assolement concerté des cultures.
- Les mesures curatives : réalisation d'ouvrages hydrauliques adaptés pour rétention temporaire (laminage de l'onde de crue) et sédimentation des boues : noues enherbées, bassin avaloir, fascines, grille de dessablage, fossé. Les méthodes curatives peuvent être des aménagements inter-parcellaires ou intra-parcellaires (bandes enherbées, fascines).

Pour une lutte efficace et optimale la mise en place de ces deux types de mesures est nécessaire (*Maes A, Regenass P., 2007*).

## II.2. Rôle des fascines

L'objet de ce stage vise à étudier la mise en place des fascines. Une fascine est un aménagement linéaire. C'est une petite diguette végétale constituée de deux rangées de pieux en quinconce entre lesquels des fagots de bois sont empilés (*Rey F., 2007*). Il existe deux types de fascines, les fascines mortes qui ont une durée de vie de 2 à 4 ans selon la nature des fagots et les fascines vivantes qui sont des fascines mortes associées à des boutures ou des plants arbustifs, principalement de saules, qui se développent facilement ce qui par la suite va progressivement transformer la fascine en haie (*Maquette Bordage D. et Nord Ouest création, 2008*).

La fascine permet de freiner la vitesse d'écoulement de l'eau et de ce fait, d'améliorer l'infiltration et de favoriser la sédimentation des particules de terres charriées. La fascine constitue un obstacle au ruissellement sans pour autant créer une zone inondable en amont. Elle agit non pas comme un barrage mais comme un filtre en piégeant les sédiments transportés par le ruissellement. Les fascines vont donc agir sur la quantité de boue transportée par le ruissellement et diminuer les débits de pointe des crues avec un étalement de l'onde de crue. Le rôle de filtre est assuré par les fagots.



Figure n°2 : Photos de fascines avant et après un événement. Source : Conseil Général du Bas-Rhin

L'efficacité de ce filtre va dépendre de la qualité des fagots. Ceux-ci doivent être bien serrés et contenir des branches de différents calibres assez fins (3cm de diamètre maximum). Les jeunes branches (plus souples et comportant de nombreuses ramifications) sont à privilégier. Les photos de la figure n°2 sont des exemples de fascines avant et après l'événement du 11 mai 2009.

Cependant, la fascine réduit la dynamique du ruissellement uniquement dans l'espace directement à l'amont d'un ouvrage. A l'aval et au-delà d'une certaine distance, l'eau reprend une vitesse à pouvoir érosif important et se recharge en sédiment. D'où la nécessité de mettre en place plusieurs fascines au sein du bassin versant. Leurs positions au sein du bassin versant vont donc déterminer leurs effets sur l'arrivée de boue à l'exutoire. Lorsque l'on cherche à diminuer la quantité de boue efficacement, la position optimale de la fascine se situerait à l'amont d'une surface non-érodable telles que des routes ou des surfaces enherbées. Ces surfaces empêchent le ruissellement de se recharger en particules de terre même si le flux d'eau prend de la vitesse. Cependant mettre des fascines uniquement en bord de route risque de ne pas être suffisant selon la taille du bassin versant. Des fascines en série au sein du bassin versant auraient plus d'impact, sous condition qu'elles soient disposées à de courtes distances l'une de l'autre pour éviter une reprise de terre, en aval des fascines, par le ruissellement dans des terres érodables (maïs, betteraves...). Ce phénomène de reprise pourra être mis en évidence par la modélisation LISEM (Cf. Partie2).

Si aucune mesure complémentaire n'est mise en place, la fascine ne sera pas efficace dans le temps. L'expérience montre que la présence d'une fascine peut modifier les écoulements du fait de l'accumulation de boue en amont. L'entretien peut devenir rapidement trop important. Pour une action optimale, la fascine doit être associée aux différentes mesures des pratiques agricoles (assolement concerté, couvert intercultures, techniques de cultures simplifiées (TCS), etc...) et à d'autres aménagements tels que les talus, bandes enherbées et fascines vivantes.

### II.3. Problématique

Si le choix des fascines comme mesure à mettre en place est fixé, leur localisation pour un effet optimal dans le bassin versant reste difficile à évaluer. Actuellement, la mise en place des fascines se fait de manière empirique que ce soit dans le Bas-Rhin ou dans les autres régions. La mise en place des fascines est régie par l'expérience (témoignages et photos des événements passés) et par une volonté émanant des élus et des exploitants, soucieux de remédier à cette problématique. Selon l'objectif que l'on recherche certaines fascines seront plus efficaces lorsqu'elles sont positionnées en tête du bassin versant, alors que d'autres seront plus efficaces réparties au sein du bassin versant. La mise en place des fascines est précisément l'objet du développement de ce stage : comment peut-on optimiser leur mise en place pour avoir un impact optimal afin de limiter les dégâts engendrés par les coulées d'eaux boueuses ? Quels sont les facteurs indispensables à prendre en compte lors de leur mise en place ?

### II.4. Objectifs

L'objectif de ce stage est de réaliser un outil d'aide à la décision pour le positionnement des fascines. L'optimisation des fascines va être étudiée sous l'angle de la modélisation. Deux types de modélisation complémentaires ont été envisagés : une modélisation à base physique (LISEM : Limbourg Soil Erosion model) et une modélisation pour l'aide à la décision (arbre de décision). Les simulations effectuées grâce au modèle permettront dans un premier temps d'établir l'efficacité de chaque fascine puis de quantifier l'influence des fascines au sein des bassins versants cela permettra de faire ressortir les facteurs qui sont déterminants lors de la prise de décision du positionnement des fascines. Par la suite, des entretiens avec diverses personnes rencontrées notamment en Alsace mais aussi dans d'autres régions (Normandie, Pas de Calais et une région de Belgique) permettront de définir les différents facteurs qui sont pris en compte lors de l'implantation des fascines. Les résultats des simulations et de l'analyse des entretiens seront exploités et hiérarchisés pour réaliser un arbre de décision. L'outil d'aide à la décision doit faire intervenir des facteurs accessibles facilement pour qu'il soit transposable pour tout autre bassin versant.

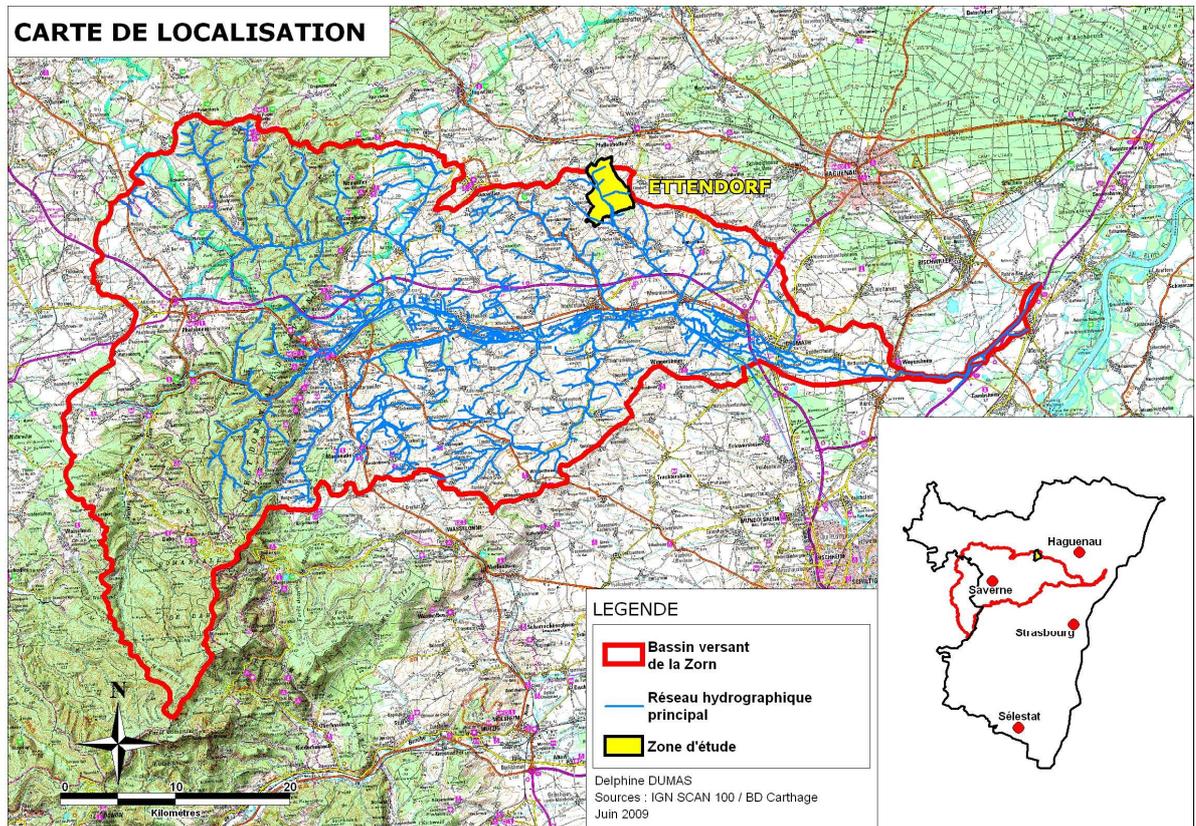


Figure n°3 : Localisation du bassin de la Zorn et des communes étudiées

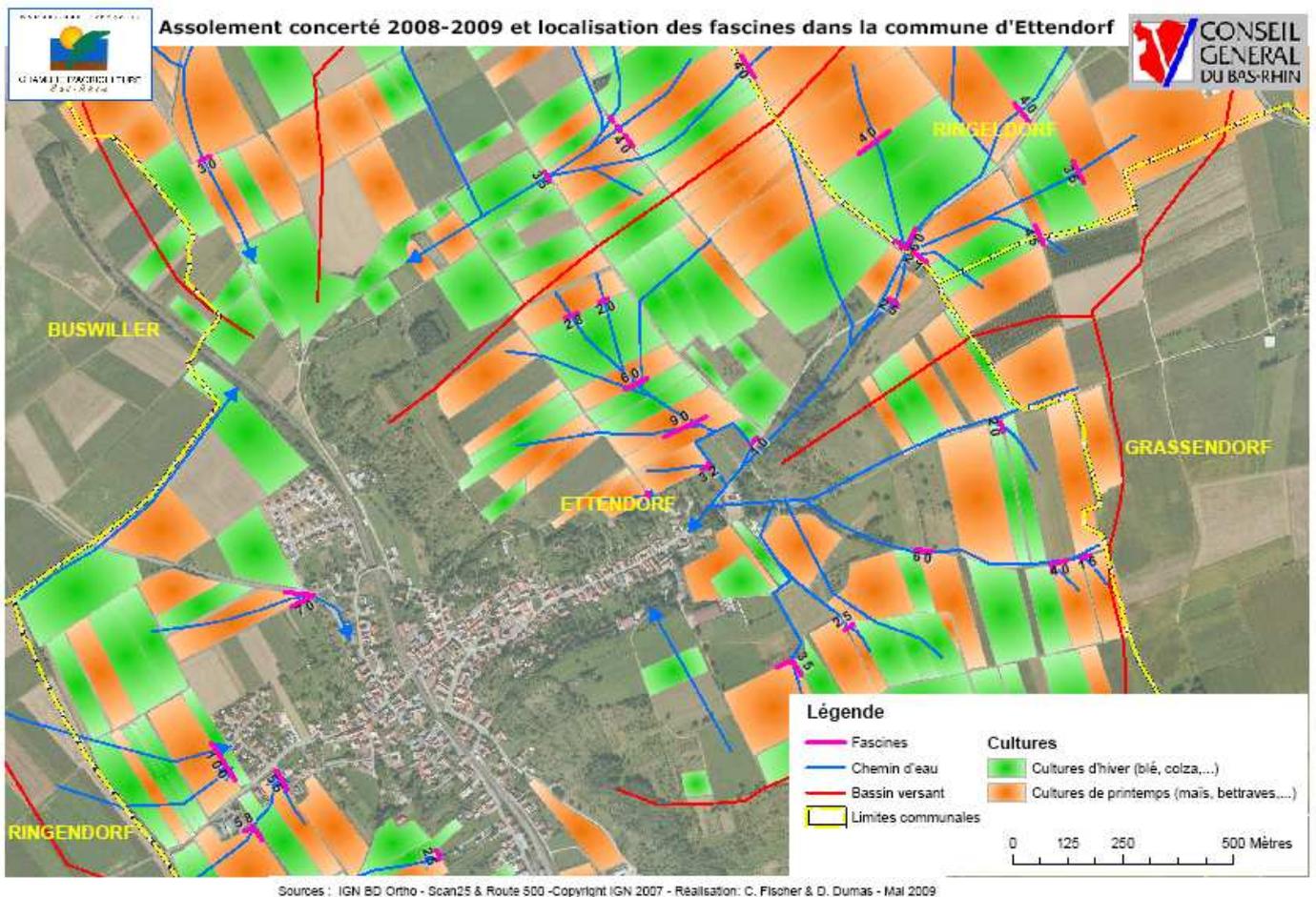


Figure n°4 : Bassin versant d' Ettendorf et localisation des fascines mises en place

La démarche suivie pour ce mémoire a été la suivante :

- Une étude bibliographique constitue la première étape indispensable car elle permet d'appréhender le problème.
- Une étude de terrain et une acquisition des données disponibles ont été faites. L'étude de terrain est essentielle pour acquérir certaines informations qui n'étaient pas disponibles, pour recueillir les témoignages des exploitants sur les événements passés.
- La modélisation par LISEM : les simulations ont permis d'établir l'efficacité des fascines individuelles, de quantifier l'influence des fascines au sein des bassins versants et de faire ressortir les facteurs qui ne peuvent être négligés lors de la prise de décision de mise en place des fascines. La modélisation par LISEM se fera en collaboration avec Paul Van Dijk, qui travaille sur ce bassin versant. Il est intervenu tout au long de la modélisation.
- L'élaboration d'un outil d'aide à la décision (arbre de décision) à partir des données acquises par les simulations et acquises sur le terrain. L'élaboration de l'arbre de décision s'est faite avec Florence Le Ber.

### **III. Secteur et moyens d'étude**

#### III.1. Secteur d'étude

Le secteur d'étude choisi l'année passée pour la phase expérimentale de mise en place de fascines est un sous-bassin du bassin versant de la Zorn situé au Nord de l'Alsace (cf. figure n°3), géré par l'antenne du Service Rivières de Saverne, lieu d'accueil de ce stage. Ce bassin s'étend des Vosges au Rhin en passant par les collines loessiques du Kochersberg à l'ouest de Strasbourg. Le Kochersberg constitue l'une des plus grandes zones agricoles d'Alsace avec une polyculture très diversifiée alliant les cultures de céréales (blé, orge, maïs), les cultures spéciales (tabac, houblon, betteraves sucrières), les cultures fourragères, les cultures maraîchères (asperges, pomme de terre), quelques vignes et arbres fruitiers.

Ce bassin versant rassemble de nombreuses communes soumises aux coulées d'eaux boueuses. Parmi elles, le bassin versant du Landgraben de la commune d'Ettendorf, équipé de plusieurs fascines, sera étudié plus particulièrement et permettra la création d'un arbre de décision.

La pluviométrie moyenne annuelle à l'intérieur du Kochersberg varie entre 620mm et 820mm selon les postes météorologiques du secteur. La répartition des pluies dans l'année connaît un maximum durant les mois de mai et juin avec des pluies mensuelles dépassant 65mm à 95mm une année sur deux. La pluviométrie de printemps est liée aux passages de perturbations d'origine atlantiques (ARAA, 2001).

#### III.2. Bassin versant d'Ettendorf

La commune d'Ettendorf est une des communes alsaciennes les plus régulièrement touchées par les coulées d'eaux boueuses. La commune d'Ettendorf est située à l'exutoire de quatre sous-bassins versants, tous plus ou moins équipés de fascines, dont les exutoires débouchent directement dans le village. Dans le temps qui nous était imparti, un seul de ces sous-bassins versants a été choisi pour les simulations avec LISEM (Cf. figure n°4). Dix-neuf fascines mortes ont été réparties au sein du bassin versant, disposées soit entre deux îlots de cultures, soit en bord de chemin

Le bassin versant s'étend sur 201 ha et se divise en deux sous-bassins versants dont la confluence se situe à quelques mètres de l'exutoire qui débouche à l'Est du village.

##### Topographie :

Ce bassin versant situé sur les pentes marneuses des collines sous-vosgiennes présente des pentes comprises entre 0% et 23% (cf. figure n°5). 47% des surfaces du bassin versant ont des pentes comprises entre 0-6%, 50% des surfaces ont des pentes comprises entre 6-16% et seulement 3% des surfaces ont des pentes supérieures à 16%. Les pentes faibles et moyennes dominent au sein du bassin versant.

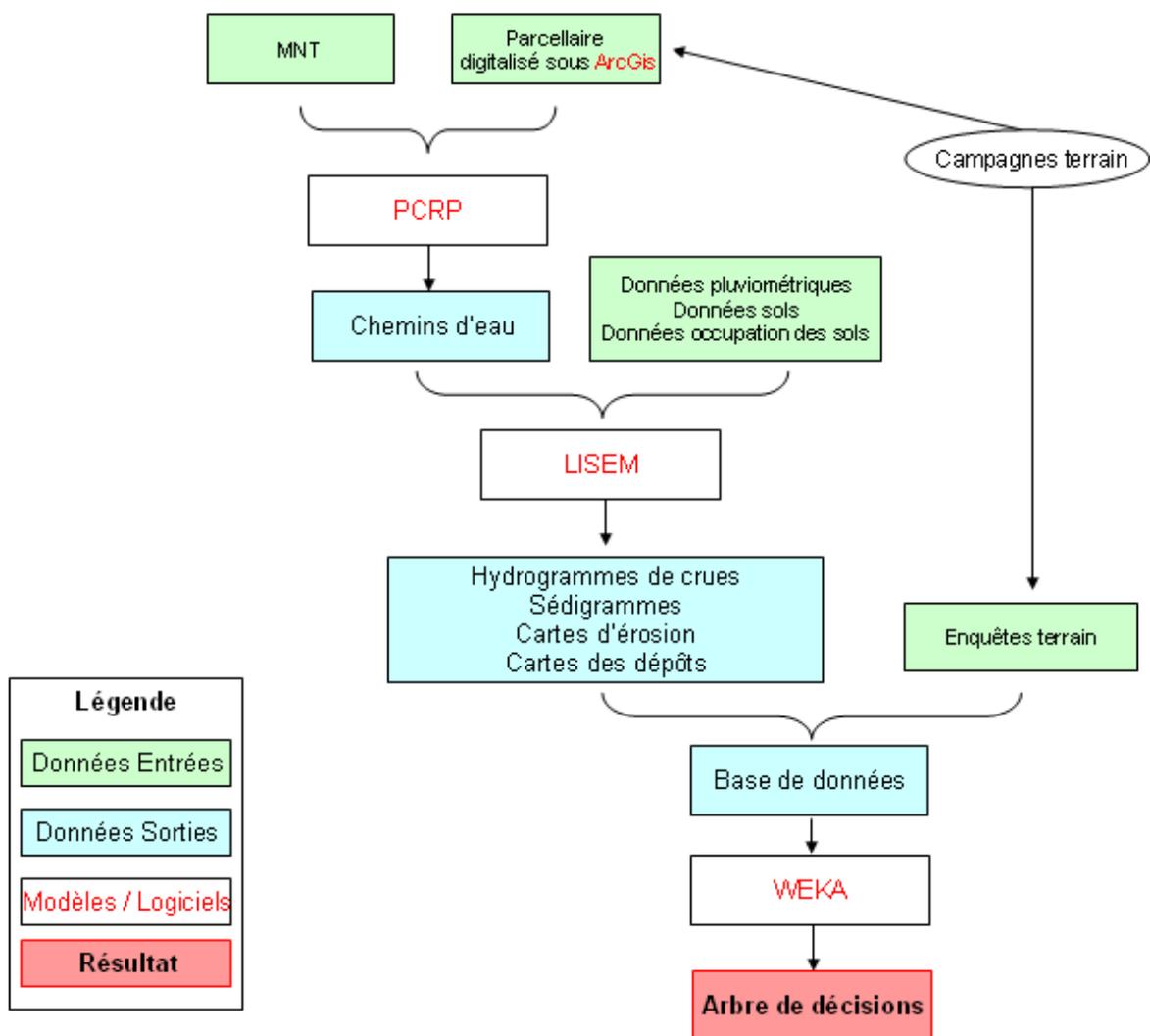
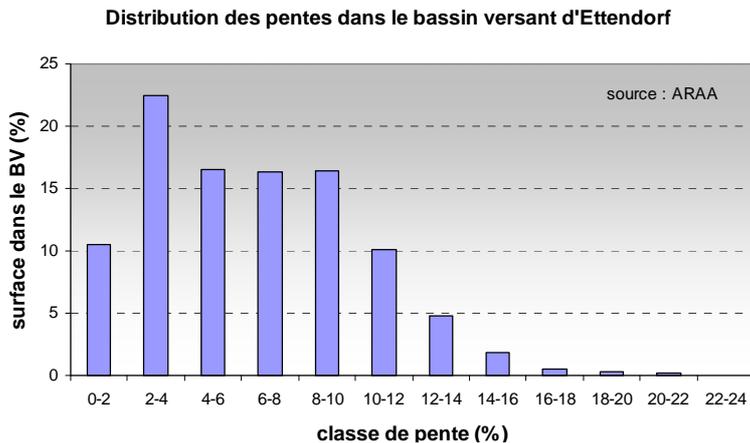


Figure n°6 : Schéma de l'articulation des données et des modèles/logiciels



**Figure n°5** : distribution des pentes dans le bassin versant d'Ettendorf. Source : Van Dijk P., ARAA

### Sol et occupation du sol :

Le bassin versant d'Ettendorf est principalement constitué de sols argilo-limoneux (ARAA, 2001). Ces sols ont une faible perméabilité du fait de leur fine granulométrie avec environ 70% de limons et 25% d'argile.

Les informations sur l'occupation du sol au sein du bassin versant ont été recueillies lors de plusieurs campagnes de terrain. Sur ce bassin versant 85% de la surface est utilisée par les cultures, soit une superficie de 171 ha. On peut constater que les cultures de printemps dominent (64%), néanmoins les cultures d'hiver sont bien représentées (36%). Cette répartition des cultures au sein des bassins versants s'est basée sur le travail d'assolement concerté réalisé par la Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin en collaboration avec les exploitants.

### III.3.Outils

Les outils nécessaires pour cette étude sont de deux types : logiciels et modèles.

#### Logiciels

Pour cette étude, deux logiciels de Système d'Information Géographique et un logiciel dédié au Data Mining ont été utilisés (cf. figure n°6) :

- **Arc View 9.3** d'ESRI pour la digitalisation des données ;
- **PC Raster**, SIG libre, pour la réalisation des cartes d'entrée du LISEM ;
- **WEKA** (Waikato Environment of Knowledge Analysis) pour l'établissement de l'arbre de décision. (<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka>) (Quinlan, 1993)

#### Modèles

Cette étude à nécessité l'utilisation successive de deux modèles, il s'agit de :

- **TCRP** (tillage Controlled Runoff Pattern) développé sous environnement PC Raster pour la modélisation des chemins d'eau en prenant en compte la topographie ainsi que les motifs agraires des parcelles.
- **LISEM** (LImbourg Soil Erosion Model), modèle Pluie-infiltration-ruissellement à base physique intégré dans un Système d'Information Géographique (SIG) en mode raster (Jetten V., 2002) (cf. Partie 2)



## **Partie II**

### **Modélisation Lisem**



## I. Introduction

LISEM (Limbourg Soil Erosion Model) est un modèle d'érosion de sol à base physique développé à l'Université d'Utrecht (*Jetten V., 2002*). Il a été créé dans le but de mesurer l'impact des mesures protectrices contre l'érosion des sols limoneux du Limbourg et permet une simulation spatiale à l'échelle du bassin versant des écoulements et des transports de sédiments pendant et juste après un événement pluvieux. LISEM prend en compte de nombreux processus mis en jeu lors du phénomène d'érosion des sols : pluie, interception, rétentions dans les micros dépressions, infiltration, ruissellement de surface, détachement des particules par effets splash, détachement par le ruissellement et dépôt (cf. annexe n°2). Le modèle LISEM est l'un des premiers modèles à base physique qui est intégré dans un Système d'Information Géographique (SIG) en mode raster, PC Raster (*Jetten V., 2002*).

LISEM n'est pas le seul modèle à pouvoir simuler l'hydrologie et le transport des sédiments. Les modèles STREAM, Hec-Ras, Hec-HMS peuvent eux aussi faire ce type de modélisation. Parmi ces modèles, le choix s'est arrêté sur LISEM pour les raisons suivantes :

- Les modèles Hec-Ras et Hec-HMS sont des modèles très compliqués qui ne peuvent être mis en œuvre dans le cadre de mon stage, de plus Hec-Ras ne permet pas de prendre en compte des micro-aménagements tels que les fascines. STREAM est un modèle à base d'expertise et non pas à base physique. De plus, la diversité pédologique des terrains n'est pas envisagée par ce modèle. Il ne permet pas non plus de connaître la distribution temporelle, c'est un modèle statique contrairement au modèle LISEM qui lui est un modèle dynamique permettant de produire des Hydrogrammes et des Sédigrammes.
- De plus, ce travail est réalisé en collaboration avec Paul Van Dijk de l'ARAA (Association pour la Relance Agronomique d'Alsace) qui travaille avec le modèle LISEM.
- Victor Jetten, Pr. Dr. université d'Utrecht, a également travaillé en collaboration sur ce projet. Il a modifié et développé le logiciel LISEM pour nous permettre de modéliser au mieux les fascines et nous a aidés dès que des problèmes survenaient lors des simulations avec le logiciel.

## II. Données d'entrée du modèle LISEM

Ce modèle est couplé avec un Système d'Information Géographique (SIG) en mode Raster dénommé PC Raster. Toutes les cartes d'entrée et de sortie du LISEM sont des cartes Raster qui sont facilement traitées et affichées avec le logiciel PC Raster. Ces cartes doivent décrire le bassin versant (végétation, infiltration, érosion et dépôts, fossés) pour cela trois cartes sont essentielles : le Modèle Numérique de Terrain (MNT), la carte des sols et la carte d'occupation du sol (acquises par une étude de terrain). Ces cartes ne peuvent pas être utilisées directement comme carte d'entrée dans LISEM, ce sont des cartes dérivées, réalisées à l'aide de PC Raster, qui sont utilisées. Certaines de ces cartes d'entrée sont directement dérivées des cartes MNT, sol et occupation du sol. D'autres en revanche, sont issues de données acquises sur le terrain et digitalisées sur SIG pour être utilisées par la suite par PC Raster (*Jetten V., 2002*).

### II.1. Cartes originelles et données pluviométriques

#### II.1.1. MNT

Le Modèle Numérique de Terrain est essentiel pour définir la topographie de façon plus ou moins précise sur l'ensemble du bassin versant. La résolution du MNT va définir la précision de la carte topographie. Le MNT utilisé dans le cadre de ce rapport est réalisé par photogrammétrie aérienne par l'Institut Géographique National (IGN). Sa résolution est de 50m, un ré-échantillonnage réalisé par Paul Van Dijk, a permis d'avoir des données topographiques d'une résolution de 5m. les données de base de LISEM dans cette résolution permet d'afficher correctement le parcellaire et les chemins d'eaux.



### II.1.2. Carte des sols

Les données sols sont essentielles lorsque l'on travaille sur la problématique des coulées d'eaux boueuses du fait que les caractéristiques physiques du sol vont conditionner le ruissellement et l'infiltration de l'eau. Les données sols utilisées pour nos bassins versants sont issues du « guide des sols d'Alsace : Petite région naturelle n°5, collines du Brumath, du Kochersberg et de l'arrière Kochersberg (ARAA, 2001). Un guide pour l'identification des sols et leur valorisation agronomique » les cartes de ce guide sont à l'échelle de la carte (1/100000) (Région Alsace, 2001).

### II.1.3. Carte de l'occupation des sols

Pour chacun des bassins versants ont été recueillies les données parcellaires (limites des îlots de cultures) qui ont permis de préparer la campagne de terrain pour réaliser la cartographie de l'occupation des sols. Ces données ont également servi de base pour la digitalisation des cartes afin de traduire les données sur papier dans un Système d'Information Géographique. Ces données ont été fournies par la chambre d'agriculture du Bas-Rhin. Par la suite, la campagne de terrain a permis une acquisition rapide des données sur l'occupation du sol de cette année ainsi que la localisation des chemins et des fossés.

### II.1.4. Données pluviométriques

Les données pluviométriques à notre disposition sont issues des simulations basées sur des chroniques de pluies issues de la station pluviométrique de Rouffach (Haut-Rhin) qui ont été fournies par Météo France. Les statistiques ont été calculées avec la méthode SHYPRE, abréviation de Simulation d'HYDrogramme pour la PREdétermination des crues. Cette méthode a été développée par le Cemagref en partenariat avec Météo France ([www.cemagref.fr](http://www.cemagref.fr), juin 2009). Ce n'est pas la station la plus proche de notre secteur d'étude mais les conditions pluviométriques sont similaires. Cette station possède des chroniques de pluies sur une trentaine d'année. La durée de pluie qui est simulée pour cette étude est de trente minutes (annexe n°3). Ce choix s'est fait par rapport aux récents orages (11-12 mai 2009) qui ont duré en moyenne une vingtaine de minutes. Les périodes de retour des pluies choisies sont 25 ans, 50 ans et 100 ans pour permettre de tester les fascines sur une large gamme d'événements pluvieux, du plus faible au plus extrême. Ces quatre périodes de retour seront traitées et rentrées pour les deux types de simulation des fascines au sein des bassins versants (cf. III.).

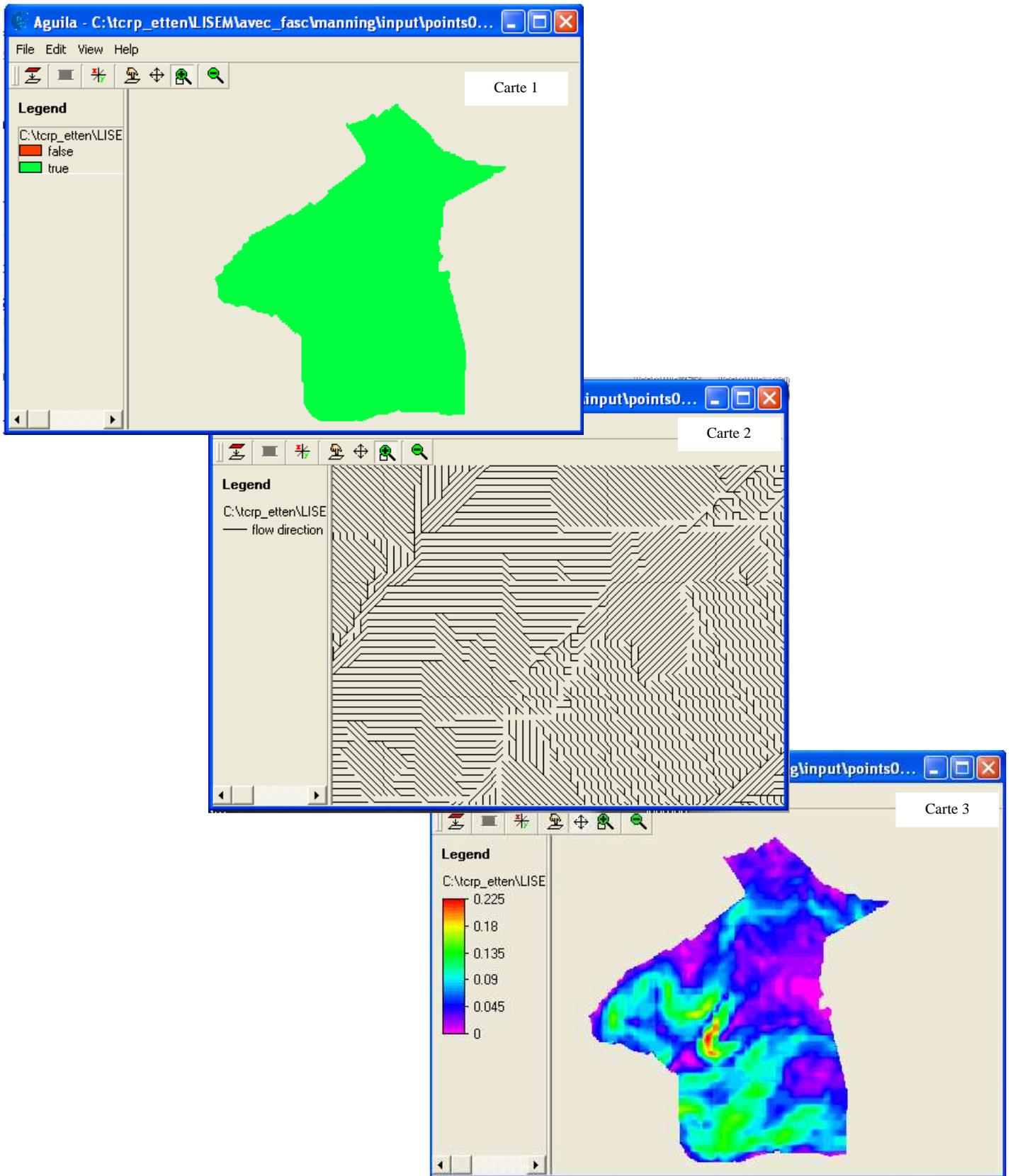
Période de retour (années)	Pluie (mm) sur 30 minutes	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité maximale (mm/h)
2	15	30	82
25	25	50	137
50	35	70	191
100	45	90	246

Tableau n°1 : caractéristiques des pluies sur 30 minutes suivant la période de retour

Une fois ces données acquises, les cartes d'entrées pour le LISEM ont pu être créées sous PC Raster. De nombreux mémoires traitent plus en détails des différentes étapes du fonctionnement de la modélisation par LISEM (Jacob A., 2008 ; Hofstetter E., 2008). Dans ce rapport, une présentation succincte des cartes d'entrées du LISEM est faite.

### II.2. Cartes dérivées du MNT (avec TCRP)

Le MNT ne peut être utilisé directement dans LISEM, des cartes en sont dérivées (cf. tableau 2). Ceci permet à l'utilisateur de faire des modifications faciles comme il est nécessaire de le faire pour les cartes OUTLET et LDD.



**Figure n°7 :** Cartes d'entrée du LISEM dérivées du Modèle Numérique de Terrain.  
 Carte 1 : Bassin versant (catch.map) ; Carte 2 : Extrait du LDD (ldd.map) ; Carte 3 : Pentes (grad.map)

General catchment maps		
Variable	Mapname	Description
Gradient	grad.map	Slope gradient in direction of flow
LDD	ldd.map	Local Drain Direction network, steepest slope
Outlet	outlet.map	Main catchment outlet, corresponding to LDD map
ID	id.map	Raingauge zone ID numbers

Tableau n°2 : Cartes dérivées du MNT

La carte des exutoires (OUTLET) qu'il s'agisse de l'exutoire principal (cf. figure n°7, carte1) ou des exutoires des sous-bassins versants est déterminée par l'utilisateur. La carte des chemins d'eau (LDD : Local Drain Direction) (cf. figure n°7, carte 2) est déterminée en considérant que l'eau va d'un point haut vers un point bas. Cependant le MNT seul ne suffit pas pour représenter au mieux l'orientation des écoulements d'eau, les motifs agraires ne peuvent pas être négligés. Le modèle TCRP (Tillage Controlled Runoff Pattern) a été utilisé pour calculer plus précisément les chemins d'eau. Ce modèle se présente sous la forme d'un script de PC Raster, qui permet de combiner le MNT et les motifs agraires. Par la suite, les informations apportées par le modèle LISEM additionnées à une campagne de terrain et des photos aériennes prises au moment de l'événement du 11 mai 2009, ont permis de faire des corrections pour refléter au mieux la réalité des chemins d'eaux.

### II.3. Cartes dérivées de la carte d'occupation des sols et de la carte sol

La carte d'occupation des sols (type de culture et végétation) est utilisée pour déterminer l'interception de la pluie et le détachement de particules par effet *Splash*. Cette carte a été établie grâce aux données acquises lors d'une campagne de terrain et qui ont été ensuite digitalisées sous ArcGis (logiciel SIG).

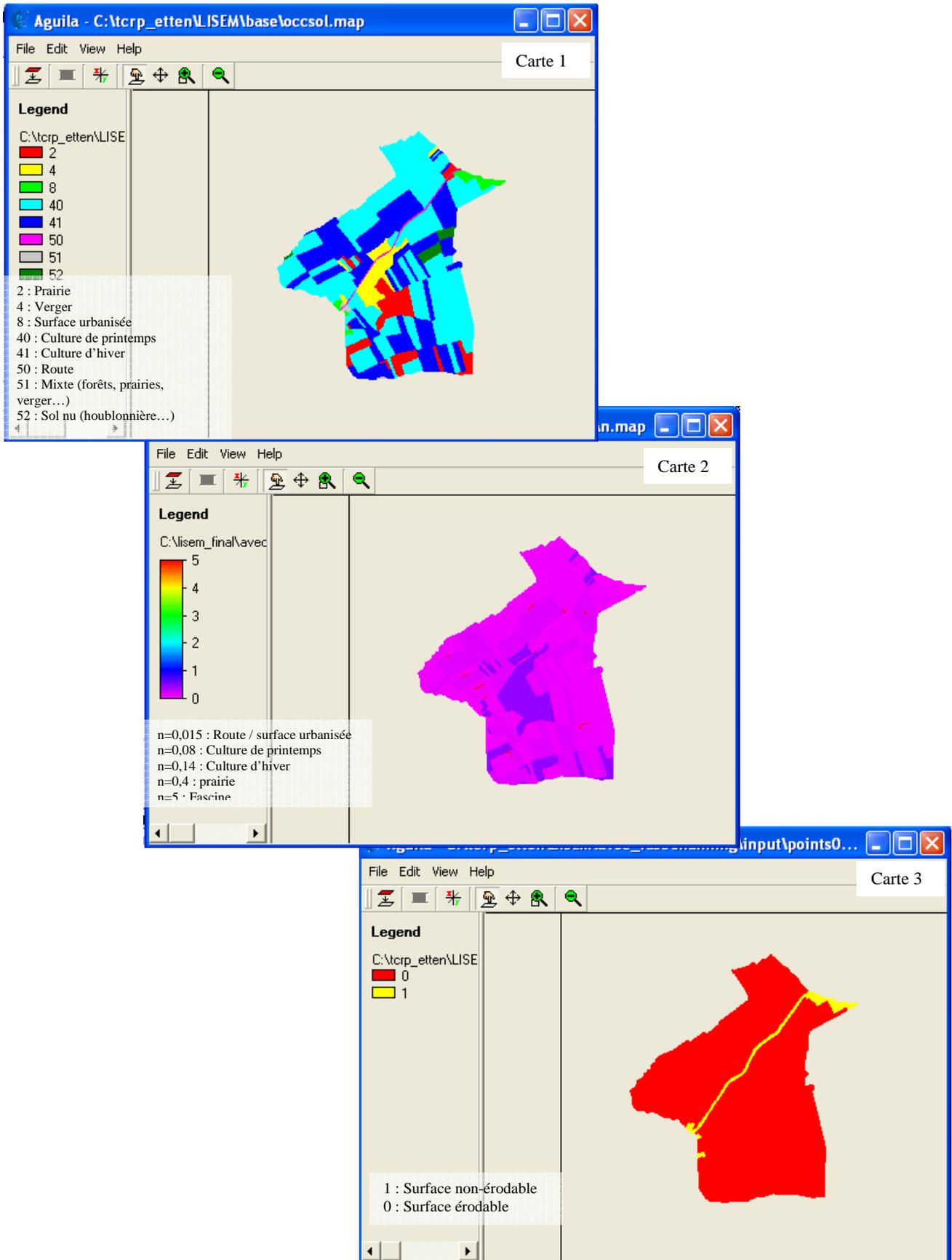
Land use and vegetation maps		
Variable	Mapname	Description
Cover	per.map	Fraction surface cover by vegetation and residue
LAI	lai.map	Leaf area index of the plant cover in a gridcell (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
Height	ch.map	Plant height (m)
Road width	roadwidt.map	Width of impermeable roads (m)
Grass strips	grasswid.map	Width of grass strips (m)

Tableau n°3 : Cartes traduisant la végétation

Les cartes d'infiltrations sont créées à partir du modèle Green & Ampt qui intègre les caractéristiques physiques des sols afin de modéliser l'infiltration de l'eau. Le logiciel LISEM a besoin des cartes suivantes :

Green & Ampt		
Variable	Mapname	Description
Ksat1	ksat1.map	Layer 1: Saturated Hydraulic Conductivity (mm/h)
Psi1	psi1.map	Layer 1: Average suction at the wetting front (cm)
Thetas1	thetas1.map	Layer 1: Porosity (-)
Thetai1	thetai1.map	Layer 1: Initial moisture content (-)
Depth1	soildep1.map	Layer 1: Depth (mm) to bottom of layer 1
Variable	Mapname	Description
Ksat Crust	ksatcrst.map	Ksat of crusts (all models except SWATRE) (mm/h)
Ksat Compact	ksatcomp.map	Ksat of compacted areas (all models except SWATRE) (mm/h)
Ksat Grass	ksatgras.map	Ksat of grassstrips (all models except SWATRE) (mm/h)

Tableau n°4 : Cartes d'infiltration (modèle de Green & Ampt, 1911)



**Figure n° 8 :** Exemples de cartes d'entrée du LISEM dérivée des données occupation du sol  
 Carte 1 : Carte de l'occupation des sols (occsol.map) ; Carte 2 : Carte du coefficient de Manning (n) (n.map) ;  
 Carte 3 : Carte des surfaces érodables ou non (hardsurf.amp)

Toutes les cartes relatives à l'érosion sont dérivées de la carte sols. Elles sont obtenues à partir de tableaux de correspondance du LISEM.

Erosion maps		
Variable	Mapname	Description
Cohesion	coh.map	Cohesion [kPa]
Cohesion	cohadd.map	Extra cohesion factor by e.g. plant roots [kPa]
Aggregates	aggrstab.map	Aggregate stability for splash erosion [-]
D50	d50.map	Median of the texture of the suspended matter ( $\mu$ )
Hard Surface	hardsurf.map	non-erodible (=1) and erodible surface (=0)

Tableau n°5 : Cartes relatives à l'érosion et au dépôt

La figure n°8 donne trois exemples de cartes d'entrées dérivées des cartes d'occupation des sols et sols : carte d'occupation des sols, carte avec le coefficient de Manning et la carte hardsurface.

#### II.4. Cartes des états de surface

Les cartes des états de surfaces déterminent les processus d'infiltration, de stockage et de ruissellement. Les cartes suivantes sont obtenues soit par des tableaux de correspondance fournis par le LISEM (Cartes RR et n) soit par des campagnes de terrain (cartes crust, compacted, stoniness) (cf. tableau n°6).

Soil surface maps		
Variable	Mapname	Description
RR	rr.map	Random Roughness (here standard deviation of heights) [cm]
n	n.map	Manning's n [-]
Crust	crustfrc.map	Fraction of gridcell covered with Crust [-]
Compacted	compfrc.map	Fraction of gridcell compacted [-]
Stoniness	stonefrc.map	Fraction of gridcell covered by stones [-]

Tableau n°6 : Cartes des états de surface

#### II.5 Cartes des chemins et routes

Les cartes suivantes sont issues des données acquises lors des campagnes de terrain qui ont été digitalisées par la suite sous SIG.

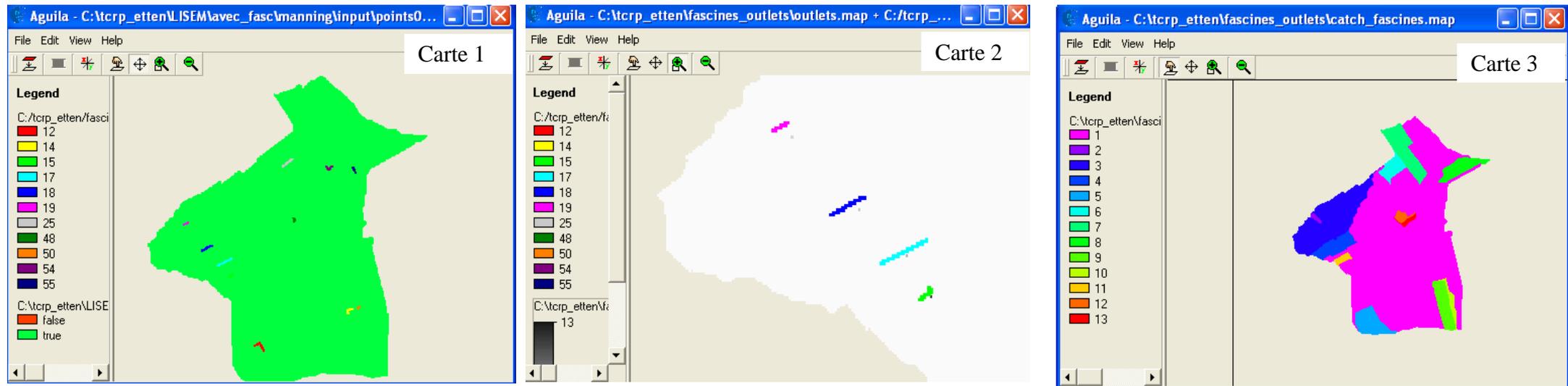
Channel maps		
Variable	Mapname	Description
LDD	lddchan.map	LDD of main channel (must be 1 branch connected to the outlet)
Width	chanwidt.map	Channel width [m]
Side angle	chanside.map	Channel side angle (between channel side and surface: 0 is rectangular, 1 = 45°)
Gradient	changrad.map	Slope gradient of channel bed [-]
N	chanman.map	Mannings n of channel bed [-]
Cohesion	chancoh.map	Cohesion of channel bed [kPa]

Tableau n°7 : Cartes des chemins et des routes

### III. Modélisation des fascines au sein du modèle

Actuellement il n'existe pas de modèle qui permette de simuler les fascines en tant que telle. Les fascines vont donc être simulées de deux manières différentes en jouant essentiellement sur le paramètre « Manning » qui nous permet de simuler un obstacle sur le chemin de l'eau :

- Méthode « Manning » : les fascines sont modélisées en augmentant la rugosité de la surface du sol. Le paramètre Manning est le paramètre dans LISEM qui permet de régler localement le degré de rugosité créant un piège à sédiments. Augmenter la rugosité permet de ralentir le



**Figure n°9 :** Cartes relatives aux fascines simulées sur le bassin versant d'Etendorf.

Carte 1 : Localisation des fascines sur le bassin versant ; Carte 2 : Localisation des outlets des fascines ; Carte 3 : bassin versant contributif de chacune des fascines.



**Figure n°10 :** photos fascines comblées par les sédiments à Etendorf lors de l'événement du 11 mai 2009.

flux d'eau ce qui va permettre le dépôt comme le ferait une fascine. Cependant la rugosité reste la même tout au long de la simulation et le modèle ne connaît pas de limite quant à la quantité de dépôts au niveau de la fascine. En réalité, la fascine se remplit et à un moment donné l'eau va contourner l'obstacle ; l'effet de ralentissement disparaît. Nous avons appliqué à chaque pixel correspondant à la fascine un Manning élevé  $n=5$  pour créer un ralentissement extrême de la vitesse d'écoulement comme c'est le cas juste en amont d'une fascine. A titre comparatif le coefficient de Manning d'une route est de 0,015, celui d'une culture de printemps est de 0,08, celui d'une culture d'hiver est de 0,14 et celui d'une prairie est de 0,4.

- Méthode « sediments traps » (*sedtrap*) : cette méthode a été proposée par Paul van Dijk et mise en œuvre par Victor Jetten qui a modifié le logiciel LISEM pour nous permettre de l'utiliser. Cette méthode consiste également à modéliser un piège à sédiments mais contrairement à la première méthode, les cellules au niveau de la fascine connaissent une capacité maximale de rétention des sédiments. Une fois que le piège à sédiment est rempli, le Manning prend la même valeur que les cellules adjacentes. La capacité de rétention que nous avons donnée aux fascines est de  $15\text{m}^3$ . Cette capacité a été choisie par rapport aux données de rétention acquises l'année dernière (Parcevicus A., 2008) mais elle peut être variée pour les fascines individuelles.

Le LISEM ne peut calculer des Hydrogrammes et des Sédigrammes uniquement sur un point et non pas sur l'ensemble d'un linéaire, de ce fait un exutoire a été déterminé pour chacune des fascines (cf. figure n°9 carte 2). Les exutoires des fascines en angle ont été faciles à choisir, en revanche ceux des fascines linéaires ont été plus délicats à déterminer. Les choix de ces exutoires peuvent induire une surestimation des Hydrogrammes et des Sédigrammes du fait qu'ils soient en aval de la fascine.

Nous avons procédé à plusieurs simulations dans cette étude afin d'évaluer l'impact des différentes fascines au sein des bassins versants et évaluer leur efficacité individuelle. Les résultats des simulations seront confrontés à l'événement du 11 mai 2009 qui a déclenché des coulées d'eaux boueuses.

Il est à noter que certaines fascines n'ont pas pu être prises en compte lors des simulations du fait de certaines imprécisions du modèle liées aux Modèle Numérique de Terrain. Les fascines qui nous semblaient les plus pertinentes ont été retenues (cf. figure n°9 carte 1).

## **IV. Événement du 11 mai 2009**

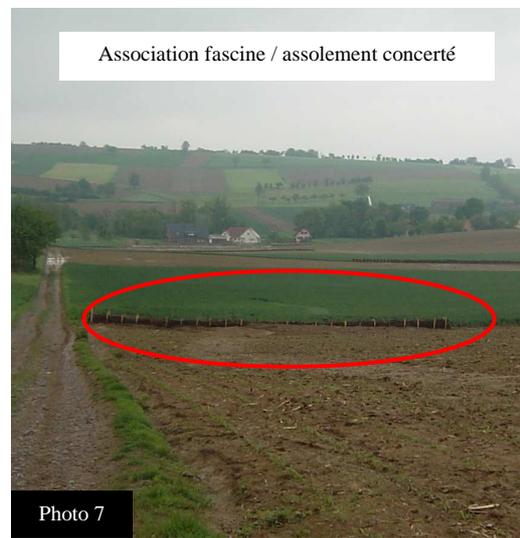
### **IV.1 Pluviométrie**

D'après les témoignages des habitants d'Ettendorf, 25mm de pluie sont tombé sur le village (sans notion de durée précise, d'après les différents témoignages l'orage aura durée 15 à 20min). L'intensité pluviométrique la plus importante durant l'orage s'est élevée à 40mm dans un laps de temps très court. D'après les statistiques de la station de Rouffach cet événement correspondrait à une pluie de période de retour comprise entre 25 et 50 ans. Dans le temps qui était imparti, nous n'avons pas eu le temps de calculer plus précisément la période de retour de la pluie.

### **IV.2 Efficacité des fascines (Observation de terrain)**

#### **Efficacité**

Au moment de l'événement, parmi les fascines mises en place, certaines étaient totalement terminées alors que d'autres étaient en cours de réalisation, ce qui a eu des influences sur leur fonctionnement. Les fascines ont retenu une quantité de boue non négligeable permettant d'avoir une eau moins chargée en sédiments dans le village (cf. figure n°10). La voirie du village a été la plus touchée contrairement aux habitations qui ont été relativement épargnées (moins d'une dizaine de caves ont été inondées). Les fascines n'ont pas été les seules mesures à avoir permis de garder la boue dans les champs : l'assolement concerté (alternance des cultures de printemps et d'hiver), les cultures en TCS et leurs associations avec les fascines ont prouvé leur efficacité (cf. figure n°11).



**Figure n°11** : photos illustrant efficacité des mesures de lutte contre les coulées d'eaux boueuses à Ettendorf lors de l'événement du 11 mai 2009.



**Figure n°12** : photos des dysfonctionnements des mesures de lutte contre les coulées d'eaux boueuses à Ettendorf lors de l'événement du 11 mai 2009.



**Figure n°13** : photos illustrant les limites des mesures mises en place

- Photos 4 et 5 sont l'illustration de l'efficacité de l'alternance des cultures de printemps et d'hiver, une quantité de boue non négligeable a pu être retenue.
- Photo 6 : L'impact que peuvent avoir les techniques culturales simplifiées est bien illustré : le champ de maïs n'a pas généré autant de boue que les autres, la fascine a permis essentiellement de retenir les fanes de maïs, qui ont tendance lorsqu'elles entrent dans le village à combler les avaloirs.
- Photo 7 : On peut observer l'efficacité de l'association d'une fascine et d'une alternance culture de printemps et d'hiver : La boue provenant du champ de maïs est resté en amont de la fascine ce qui a permis de protéger le blé (qui ne s'est pas couché) et d'éviter une recharge en sédiment de l'eau après la fascine.

### **Dysfonctionnements :**

On a pu observer quelques dysfonctionnements : rupture et contournement des fascines (cf. figure n°12) :

- Photo 8 : Rupture de fascine. Même si la fascine s'est rompue on peut observer qu'une certaine quantité de boue s'est tout de même déposée et a été stockée en amont de la fascine (cercle rouge). D'une part, la rupture de cette fascine peut s'expliquer par le fait que la fascine était en cours de réalisation (les rangées de pieux n'étaient pas ligaturées). D'autre part la surface amont contributive étant très importante et essentiellement constituée de cultures de printemps a généré une grande pression à l'amont entraînant la rupture de la fascine.
- Photo 9 : Contournement de fascine. On peut observer sur cette photo que la fascine a été contournée. La fascine avait été placée par rapport au chemin d'eau de l'année précédente (présence d'un talweg marqué) or cette année les écoulements n'ont pas emprunté le même chemin. Ce changement peut s'expliquer par le fait que les écoulements étaient issus principalement d'un autre versant que celui de l'année dernière (l'autre étant majoritairement occupé par des cultures d'hiver, il y a eu moins d'écoulement) et par le fait que le blé en jouant son rôle de frein au ruissellement a permis à l'eau d'emprunter un « mini » talweg que nous n'avions pas remarqué au moment de la mise en place des fascines. Les fascines contournées ont été rallongées par la suite pour capter l'écoulement dans son ensemble.

### **Limites :**

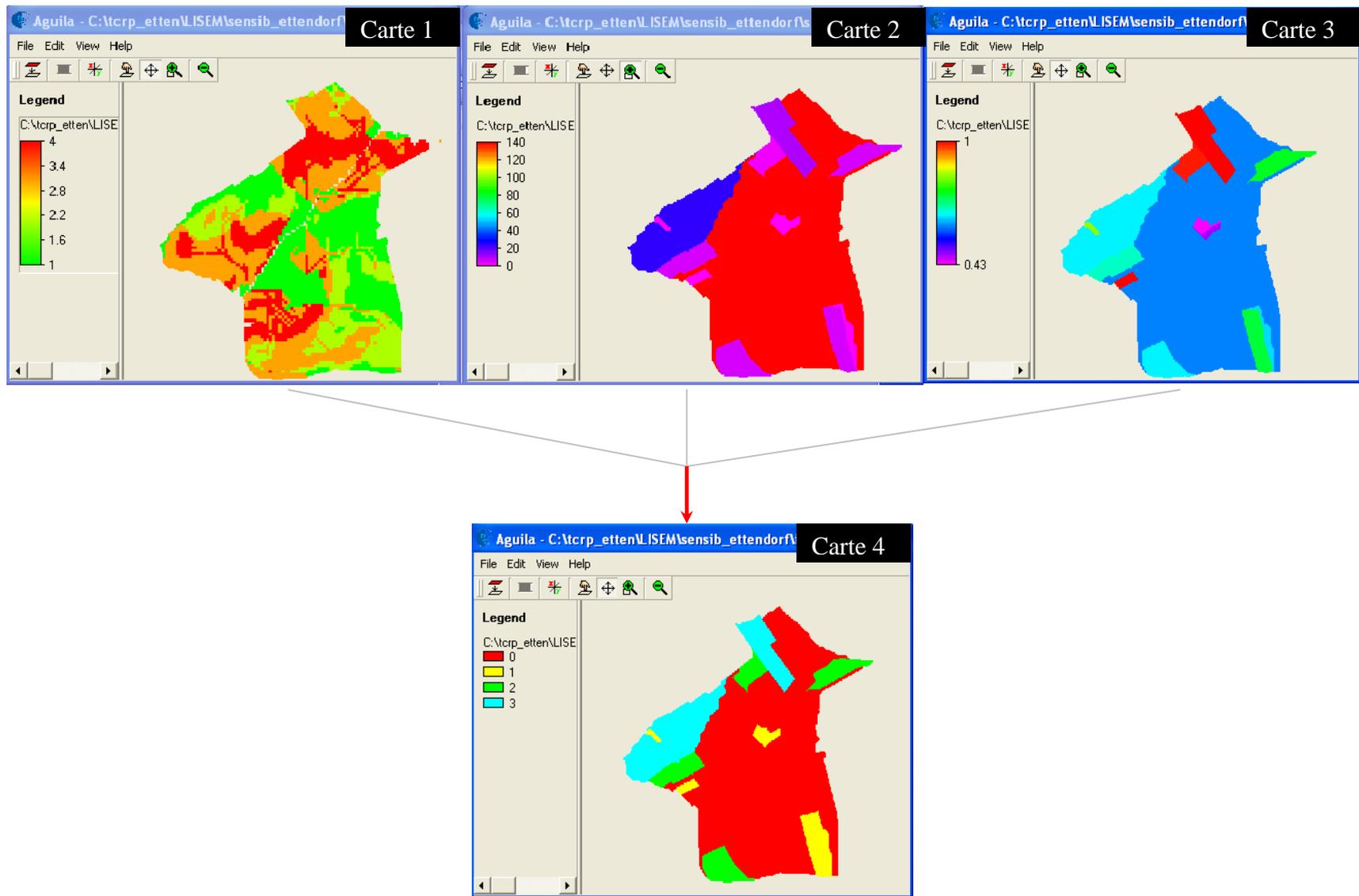
On a pu également observer pour cet événement les limites des mesures mises en place (cf. figure n°13) :

- Photo 11 : L'alternance des cultures n'a pas suffi à arrêter le flux d'eau chargée en sédiment. Le blé s'est couché sous la force de l'eau qui n'a par la suite plus joué son rôle de frein. Le blé couché représente une surface lisse ce qui a pu permettre à l'eau de prendre de la vitesse.
- Photo 12 : Même si les fascines ont toutes joué leur rôle de filtre, certaines se sont remplies et ont débordé par les côtés.

Un des effets indésirables engendré par une fascine est la concentration de flux d'eau en aval de la fascine ce qui va favoriser l'arrachement des sédiments.

Les différentes mesures prises pour lutter contre les coulées d'eaux boueuses ont dans l'ensemble fonctionné et ont prouvé une fois de plus leur efficacité dans leurs limites de filtres des sédiments. Nos efforts sur l'implantation des différentes mesures doivent être poursuivis :

- L'alternance des cultures doit être plus marquée afin d'accentuer l'effet damier des cultures ;
- La mise en place du réseau de fascines doit être poursuivi afin de limiter les surfaces contributives en amont de chacune des fascines pour une efficacité optimale ;



**Figure n°14 :** Carte du bassin versant avec les différents facteurs et l'indicateur

Carte 1 : carte de sensibilité des sols à l'échelle de notre bassin versant. Source : Van Dijk P. ARAA

Carte 2 : carte du facteur surface en amont

Carte 3 : carte facteur Culture

Carte 4 : carte de l'indicateur « sensibilité d'apport en sédiment

les techniques culturales simplifiées ont fait leur preuve au cours de cet événement en limitant la perte de terre des champs, elles devront dans la mesures du possible se développer au sein du bassin versant (rôle de la Chambre d'Agriculture).

Une simulation pour chacune des pluies (25, 50 et 100ans) a été faite selon un scénario « fascine en bord de routes » pour voir l'impact des fascines à l'exutoire du bassin versant lorsqu'il n'y a aucune surface sensible à l'érosion en aval de chaque fascine.

## V. Résultats et Analyses

### V.1 Indicateur « sensibilité d'apport en sédiment»

Afin d'établir l'efficacité des fascines au sein du bassin versant en fonction des différentes pluies (période de retour de 25, 50 et 100 ans) un indicateur appelé « Indicateur Sensibilité d'apport en sédiment » a été créé.

Cet indicateur est composé de trois facteurs simples à déterminer afin qu'il soit transposable dans d'autres régions pour divers bassins versants. Les trois facteurs pris en compte sont :

- **L'indice de sensibilité ( $I_s$ )** : Cet indice est basé sur une méthode d'estimation d'aléa érosif regroupant des informations liées au sol, à l'occupation du sol, à la topographie et au climat. L'indice de sensibilité est indépendant du climat et est fonction de la topographie (pente, surface en amont de chaque point = indicateur de la concentration du ruissellement), des caractéristiques des sols (sensibilité à la battance et érodibilité) et de l'occupation du sol (forêt, prairie, terres arables, surface urbanisée, etc.). La sensibilité à l'érosion est estimée en cinq classes allant de « très faible » (classe1) à « très fort » (classe 5). Une carte de sensibilité des sols à l'érosion en Alsace a été réalisée à partir de cet indice par l'ARAA (Van Dijk et al., 2009 ; cf. annexe n°6). L'indice de sensibilité pour notre bassin versant a été obtenu par une extraction à partir de la carte de l'ARAA (cf. figure n°14, carte 1).

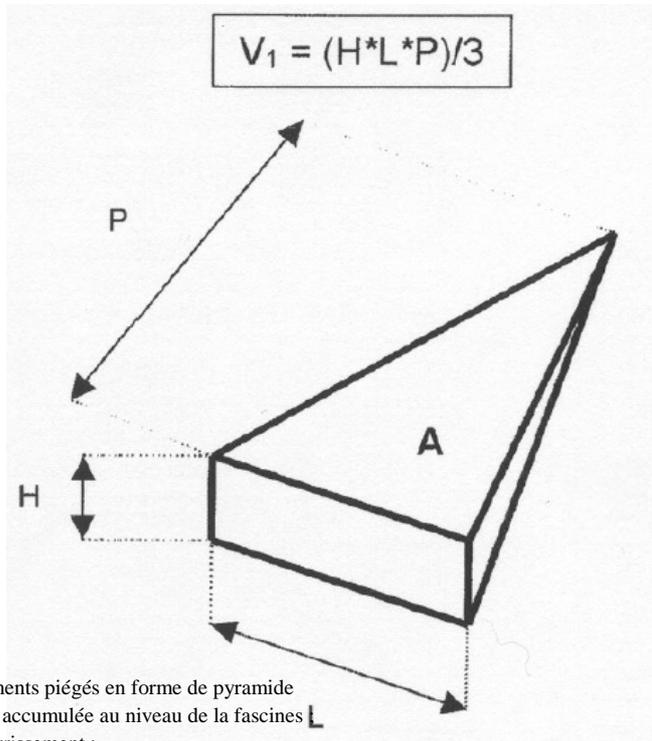
Seul, cet indicateur de sensibilité des sols à l'érosion n'est pas suffisant pour notre étude sur l'efficacité des fascines. La surface contributive ainsi que le type de culture en amont des fascines influencent l'apport en sédiment et donc influent sur leur efficacité. Ces deux facteurs doivent être pris en compte lorsque l'on envisage la mise en place des fascines.

- **Le facteur surface amont ( $F_{sa}$ )** : Ce facteur prend en compte la surface contributive en amont de la fascine qui influence l'efficacité des fascines (cf. figure n°14, carte 2).
- **Le facteur culture ( $F_c$ )** : Le type de cultures a une influence sur la sensibilité des sols à l'arrachement de terre. Ce facteur prend en compte le pourcentage de culture de printemps présent en amont de la fascine. Si en amont de la fascine toutes les cultures sont des cultures d'hiver la surface amont sera moins sensible à l'arrachement de terre que si nous avons uniquement des cultures de printemps sur toute la surface contributive en amont de la fascine. Ce facteur varie de 0,43 (plus de 75% des cultures sont des cultures d'hiver) à 1 (toutes les cultures sont des cultures de printemps) (cf. figure n°14, Carte3).

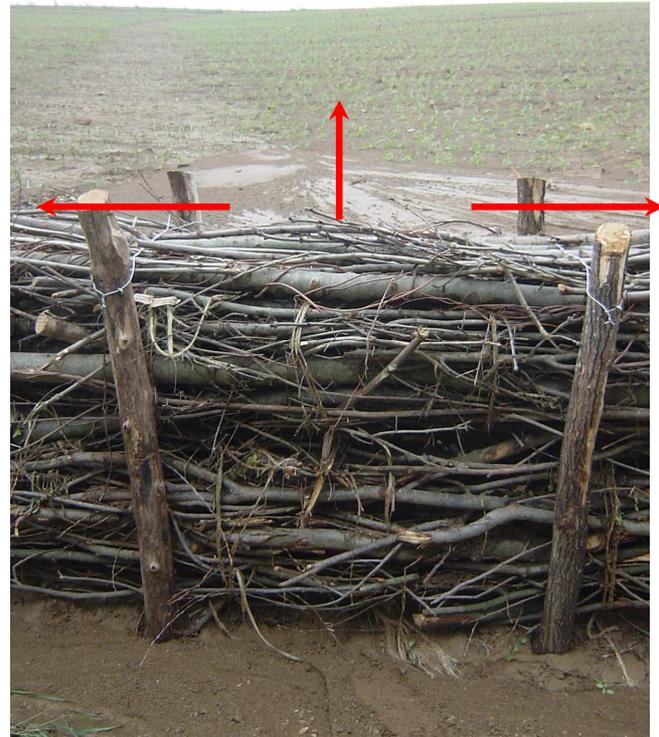
$$\text{Indicateur Sensibilité apport sédiment} = I_s \times F_{sa} \times F_c$$

Notre indicateur est estimé en trois classes allant d'une sensibilité d'apport en sédiment faible (classe1) à une forte sensibilité d'apport en sédiment (classe 3) (cf. figure n°14, carte 4).

D'autres facteurs intervenants dans cette problématique ne sont pas pris en compte dans cet indicateur, tels que la répartition des cultures en amont des fascines qui joue un rôle important sur l'apport en sédiment. Cependant un tel facteur est difficile à établir or l'objectif recherché est que l'indicateur puisse être facilement établi à partir de données simples à acquérir afin qu'il puisse être transposable dans d'autres régions.



A = Volume de sédiments piégés en forme de pyramide  
 H = Hauteur de boue accumulée au niveau de la fascines L  
 L = Largeur de l'atterrissement ;  
 P = Longueur de l'atterrissement vers l'amont de la ravine



**Figure n°15** : Calcul de la capacité de rétention des fascines et problème de surestimation des volumes  
*Schéma* : Méthode de calcul du volume de terre accumulée en amont de la fascine. Source : Rey F., 2007  
*Photo* : Diminution « bidirectionnelle » de l'épaisseur de boues en amont des fascines. (Les flèches rouges indiquent les directions de diminution d'épaisseur de terre accumulée)

## V.2 Efficacité individuelle des fascines durant l'événement du 11 mai 2009

Une campagne de terrain nous a permis d'estimer la capacité de rétention des fascines lors de cet événement. Les volumes de terre accumulés en amont des fascines ont été déterminés à partir d'une des méthodes de calcul des capacités de rétention des fascines par Rey F. (cf. annexe 4). La méthode choisie est celle où la terre accumulée est modélisée sous forme d'une pyramide (cf. figure n°15, schéma). La forme pyramidale est celle qui se rapproche le plus de la réalité de terrain. Même si cette méthode est l'une des plus justes pour le calcul d'un tel volume, elle surestime le volume de terre du fait que nous n'avons pas une « pyramide de terre » parfaite en amont de la fascine. L'épaisseur de la terre est au maximum vers le centre de la fascine et décroît non seulement lorsque l'on s'éloigne de l'ouvrage mais également lorsque l'on se dirige vers ses côtés (cf. figure n°15, photo).

Le tableau suivant récapitule les volumes de boues que les fascines ont permis de retenir pour l'événement du 11 mai 2009 :

n° fascine	Indicateur	volume de boue retenu (tonnes)	volume boue transité (tonnes) *** LISEM	Efficacité de rétention des sédiments
2*	faible	9	1,9	—
3**	fort	7	27,9	25%
4**	moyen	1	59,3	2%
5*	moyen	2	0	—

\* Incohérence entre la réalité et le logiciel ; \*\* : Fascines contournées ; \*\*\* : Volume de boue transité au point d'exutoire de la fascine en l'absence de la fascine.

Notons que les volumes de sédiments engendrés par les simulations sont issus d'une distribution de pluie homogène sur tout le bassin versant ce qui entraîne des imprécisions sur ces volumes. Dans la réalité, une pluie ne tombe pas de manière homogène sur tout le bassin versant ce qui engendre des imprécisions sur les volumes simulés par le logiciel LISEM. Cependant le logiciel LISEM peut permettre de varier des pluies dans l'espace du bassin versant, mais nous n'avons pas de données permettant de produire cette variabilité spatiale. Néanmoins, les résultats obtenus avec le logiciel nous donne un ordre d'idée sur les volumes de sédiments et d'eau transités au niveau des fascines et à l'exutoire principal.

Les fascines n°2 et 5 présentent une rétention supérieure à ce qu'elles auraient pu avoir, pour un tel événement, d'après LISEM. Ces deux fascines ont des surfaces contributives très petites, respectivement 0,5ha et 1ha. Cette différence peut s'expliquer soit par le fait que le logiciel LISEM a sous-estimé la sensibilité à l'érosion des petites surfaces soit par le fait que la distribution des pluies est homogène sur tout le bassin versant. Lors de l'événement survenu le 11 mai, l'orage s'est concentré sur un des versants du bassin versant entraînant un ruissellement plus important sur ce versant et donc un arrachement de sédiment plus important ce qui explique le volume de sédiment présent en amont de la fascine que le logiciel n'avait pas prévu.

Les fascines n°3 et 4 ont été contournées ce qui explique le faible taux d'efficacité que nous avons pu observer. Les fascines avaient été placées par rapport au chemin d'eau de l'année précédente (présence d'un talweg marqué) or cette année les écoulements n'ont pas empreintés le même chemin. Ce changement peut s'expliquer par le fait que les écoulements étaient issus principalement d'un autre versant que celui de l'année dernière.

## V.3 Efficacité individuelle des fascines d'après les simulations

### Efficacité de rétention des sédiments et incidence sur les débits

Dans les paragraphes suivants, je vais m'intéresser uniquement à trois fascines représentantes chacune une classe de l'indicateur (fascines surlignées en jaune dans le tableau n°8). Les tableaux ci-dessous représentent l'efficacité de rétention des sédiments des fascines (tableau de gauche) et l'efficacité de rétention du flux d'eau des fascines (tableau de droite).

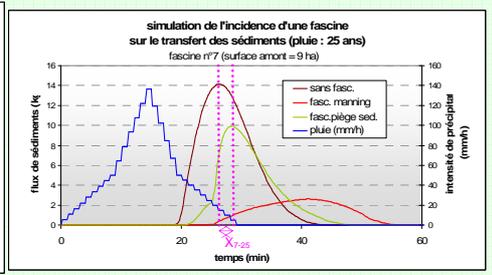
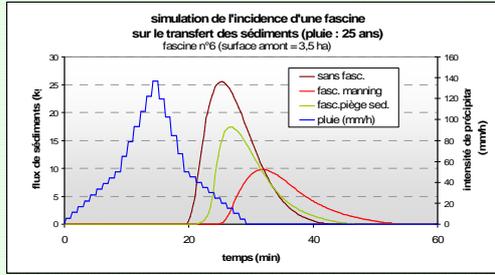
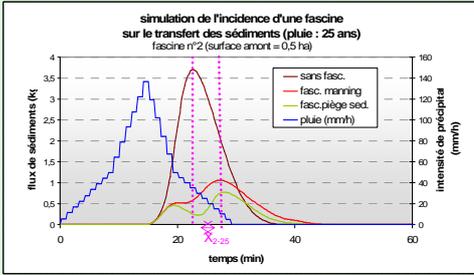
## Pluie d'une période de retour de 25 ans

### Fascine n°2

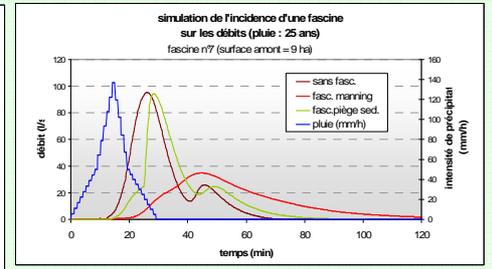
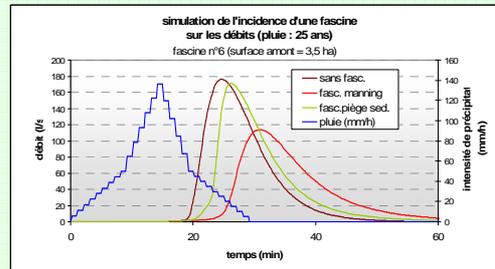
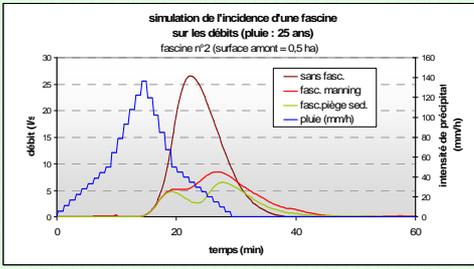
### Fascine n°6

### Fascine n°7

SÉDIGRAMME



HYDROGRAMME



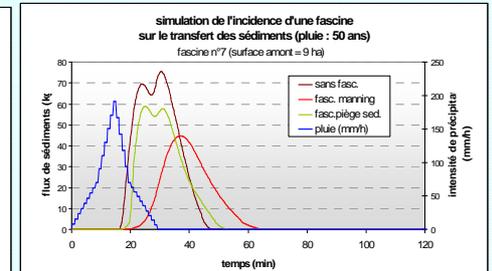
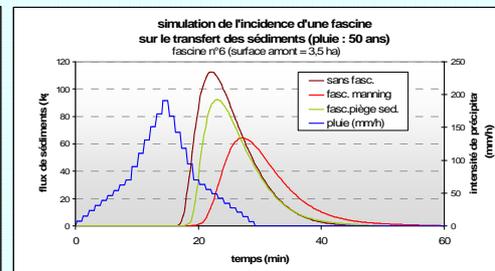
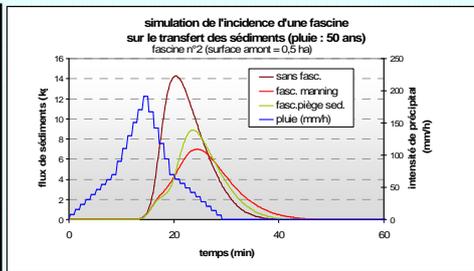
## Pluie d'une période de retour de 50 ans

### Fascine n°2

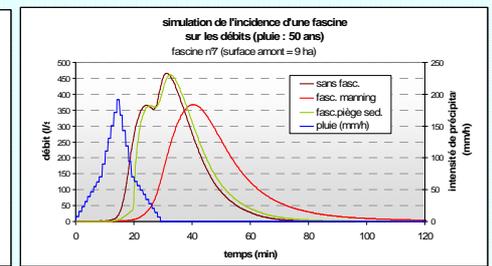
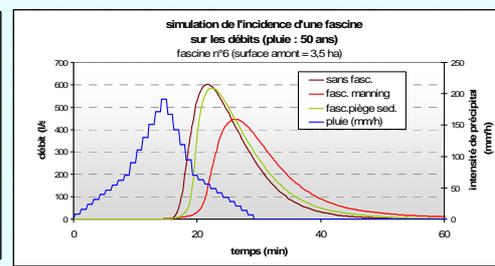
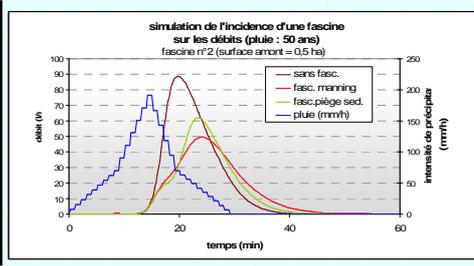
### Fascine n°6

### Fascine n°7

SÉDIGRAMME



HYDROGRAMME



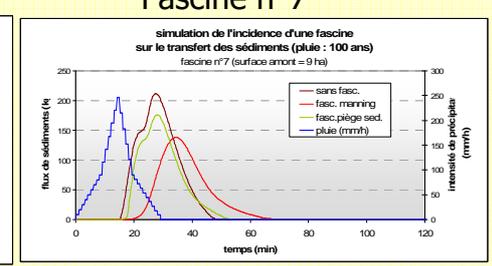
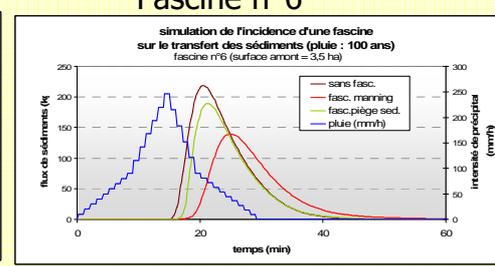
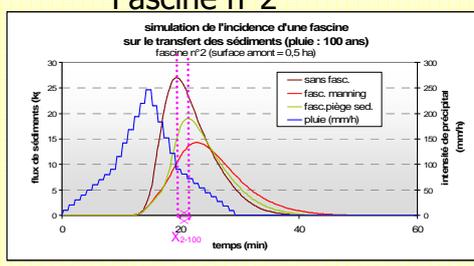
## Pluie d'une période de retour de 100 ans

### Fascine n°2

### Fascine n°6

### Fascine n°7

SÉDIGRAMME



HYDROGRAMME

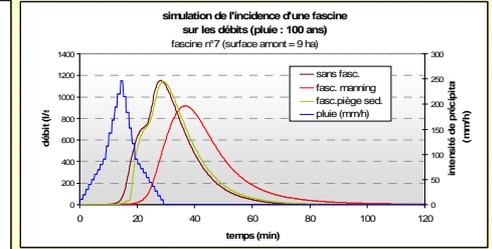
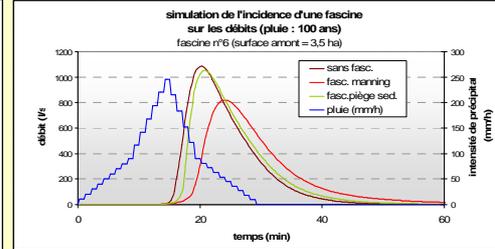
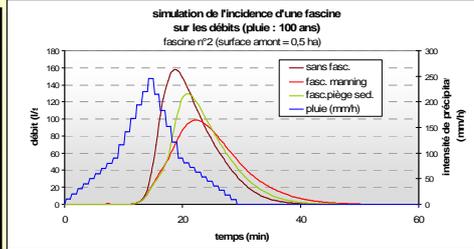


Figure n°16 : Sédigrammes et Hydrogrammes des fascines n°2, 6 et 7 pour les différentes pluies

SEDIMENT							DEBIT						
Manning			sedtrap				Manning			sedtrap			
n° fascine	100 ans	50 ans	25 ans	100 ans	50 ans	25 ans	n° fascine	100 ans	50 ans	25 ans	100 ans	50 ans	25 ans
<b>Indicateur faible</b>							<b>Indicateur faible</b>						
2	27%	32%	58%	24%	32%	73%	2	13%	22%	49%	12%	23%	63%
9	6%	34%	49%	6%	10%	20%	9	4%	8%	26%	2%	4%	19%
11	30%	51%	100%	25%	20%	100%	11	4%	6%	13%	4%	9%	27%
<b>Indicateur moyen</b>							<b>Indicateur moyen</b>						
4	10%	16%	37%	9%	13%	27%	4	2%	4%	12%	0,4%	1%	4%
5	3%	9%	30%	7%	12%	27%	5	2%	4%	11%	0,2%	1%	4%
6	24%	32%	51%	16%	21%	35%	6	6%	8%	15%	2%	1%	6%
8	5%	8%	17%	4%	5%	11%	8	0,3%	1%	1%	1%	2%	5%
10	5%	62%	100%	12%	19%	100%	10	7%	12%	46%	7%	15%	71%
<b>Indicateur fort</b>							<b>Indicateur fort</b>						
3	11%	8%	14%	10%	7%	13%	3	1%	2%	8%	0,5%	1%	4%
7	26%	37%	69%	18%	21%	36%	7	1%	3%	15%	0,2%	1%	5%

**Tableau n°8** : Efficacité de rétention des sédiments et d'eau des fascines

On peut observer d'une manière générale que l'efficacité de rétention de fascines que se soit pour la rétention des sédiments ou pour la rétention d'eau (c'est-à-dire l'infiltration de l'eau en amont de la fascine) diminue en fonction de l'importance de l'événement et de l'importance de l'indicateur. Plus l'indicateur est fort et l'événement rare (correspondant à la période de retour de 100ans, cf. §II.1.4) plus son efficacité est faible. Inversement, l'efficacité d'une fascine est d'autant plus importante que l'apport en sédiment est faible et que l'événement est récurrent (période de pluie 25ans, cf. §II.1.4).

Certaines fascines ne suivent pas la tendance générale observée comme la fascine n°10, la fascine n°9 ou encore la fascine n°7. Concernant les fascines n°10 et n°7 on observe qu'elles ont des efficacités plus élevées que les fascines ayant la même classe d'indicateur alors que la fascine n°9 a une efficacité de rétention plutôt faible en rapport aux autres fascines de même classe. Ceci peut s'expliquer par le fait que notre indicateur ne prend pas en compte plusieurs facteurs qui influencent l'apport en sédiments tels que la répartition des cultures mises en place sur la surface contributive des fascines, le type de fascine à savoir si c'est une fascine d'angle ou droite et le fait que les fascines soient disposées en série ou non.

#### Effet sur les débits de pointe

D'après les Sédigrammes et les Hydrogrammes (cf. figure n°16), on observe que le flux des sédiments et le débit pour toutes les fascines est fonction de l'événement. Plus l'événement est rare (quantité de pluie plus importante) plus le flux de sédiment et le débit sont importants. On peut également observer que les pics de flux sont décalés dans le temps et qu'il y a un laminage de la crue au niveau de chacune des fascines et pour toutes les pluies mais dans différentes mesures.

La classe de l'indicateur ainsi que l'événement pluvieux influence l'incidence de la fascine sur les pics de flux de sédiments et des débits. Plus la classe de l'indicateur est forte et plus l'événement pluvieux est rare, moins la fascine aura d'efficacité sur le pic du flux de sédiments ainsi que celui du débit : le décalage dans le temps sera moindre (cf. figure n°16, tracé rose,  $X_{2-100} < X_{2-25}$  et  $X_{7-25} < X_{2-25}$ ).

#### Comparaison des méthodes de modélisation des fascines

Nous avons utilisés deux méthodes pour modéliser les fascines : méthode *Manning* et méthode *Sedtrap* (cf. III). On peut voir que la méthode *Manning* engendre beaucoup plus d'impact que ce soit sur les volumes d'eau ou sur les quantités de boue, du fait que le dépôt en amont de la fascine se fait tout au long de la simulation contrairement à la méthode *Sedtrap*. Le fonctionnement réel de la fascine se situe entre ces deux méthodes : il n'y a pas de dépôt tout au long de l'événement comme le simule la méthode *Manning* mais il ne s'arrête pas non plus totalement après remplissage de la



capacité de rétention de la fascine comme le simule la méthode Sedtrap. De la sédimentation est encore possible après, du fait de la présence d'un replat formé en amont de la fascine par les dépôts.

Notons que la présence des fascines ne détériore pas la situation initiale c'est-à-dire la situation sans fascines et cela pour toutes les classes de l'indicateur et pour tout événement pluvieux.

#### V.4 Remplissage des fascines : modélisation fascine méthode *Sedtrap*

La nouvelle version du logiciel LISEM réalisé par Victor Jetten nous permet d'observer le taux de remplissage des fascines au cours du temps pour la simulation des fascines en version sedtrap. Rappelons que nous avons déterminé la capacité des fascines à 15 m<sup>3</sup> pour les simulations. La capacité des fascines varie en fonction de leur longueur ainsi que la pente de la surface en amont. Les données peuvent être transposées pour d'autres capacités.

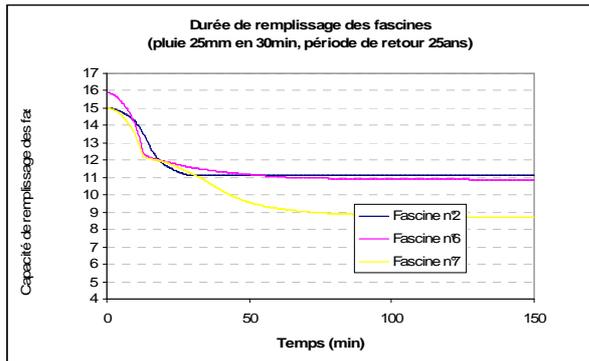


Figure n°17 : Durée de remplissage des fascines pour une pluie d'une période de retour de 25 ans

Comme nous pouvons observer sur la figure n°17 pour un événement pluvieux d'une période de retour de 25 ans aucunes des trois fascines n'est remplie entièrement, leur capacité de rétention est diminuée d'environ de moitié. L'événement pluvieux n'a pas engendré assez de sédiments pour les combler. Le remplissage des fascines est fonction de la classe de l'indicateur. La fascine la moins remplie appartient à la classe « Faible » et la fascine où il y a eu le plus de dépôts est celle qui a une surface de forte sensibilité d'apport en sédiment. Cependant le fait que la fascine n°7

soit beaucoup plus comblée que les deux autres, outre la sensibilité forte à l'apport en sédiment, cela peut s'expliquer par le fait que ce soit une fascine d'angle. Néanmoins, ces trois fascines seront encore efficaces pour un autre événement de cette ampleur.

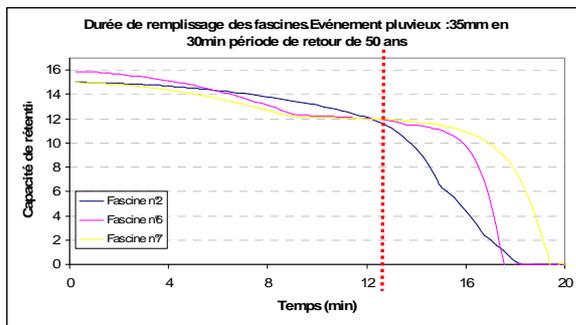


Figure n°18 : Durée de remplissage des fascines pour une pluie d'une période de retour de 50 ans

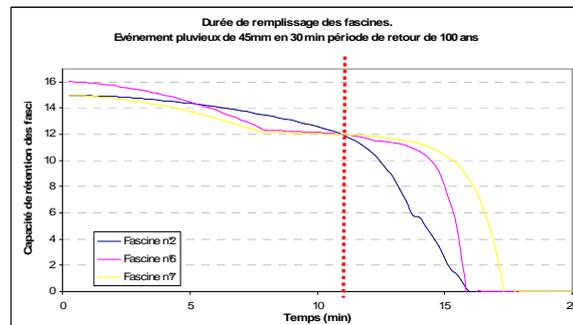


Figure n°19 : Durée de remplissage des fascines pour une pluie d'une période de retour de 100 ans

Sur les figures 18 et 19 nous pouvons constater que toutes les fascines se comblent entre la 18<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> minute. Les courbes se présentent en deux parties :

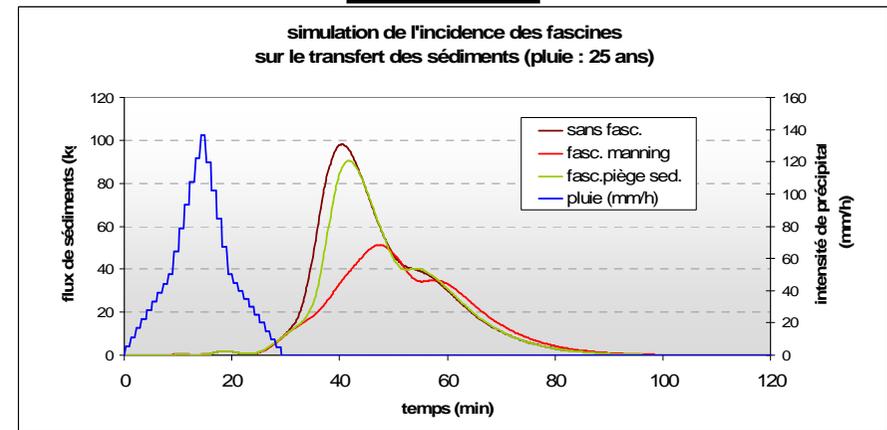
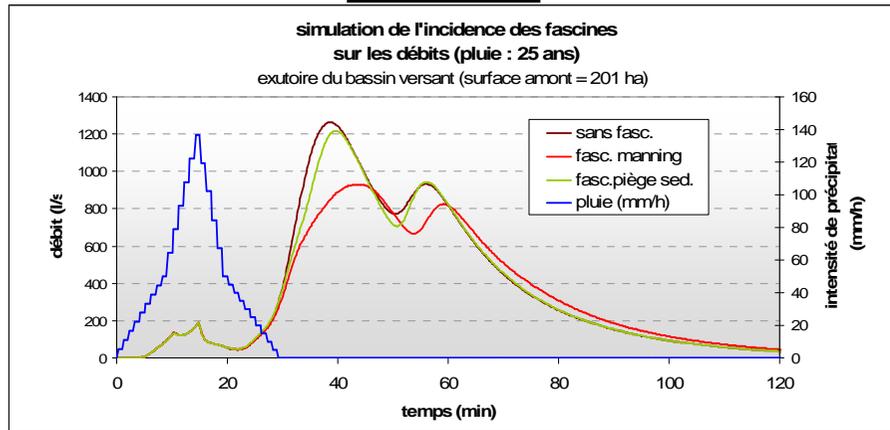
- 1<sup>ère</sup> partie (gauche de la ligne rouge, entre 0 à 12 minutes environ) : le remplissage des fascines se fait de façon linéaire et est dû à l'apport des sédiments provenant de la surface juste en amont de la fascine.
- 2<sup>ème</sup> partie -12 à 20min – (à droite de la ligne rouge) : La courbe de remplissage des fascines à une allure d'hyperbole. Cette transition correspond à l'intensité maximale de la pluie (cf. figure n°14). Le flux de sédiment de la surface contributive augmente rapidement à partir de la douzième minute du fait que toute la surface en amont de la fascine est contributive.

A partir d'un événement pluvieux de 45mm en 30min on observe que le temps de remplissage des fascines varie peu pour des événements pluvieux plus importants.

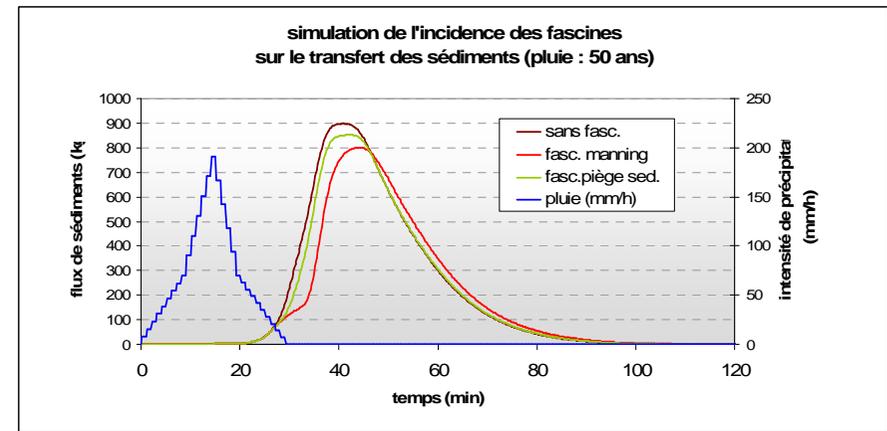
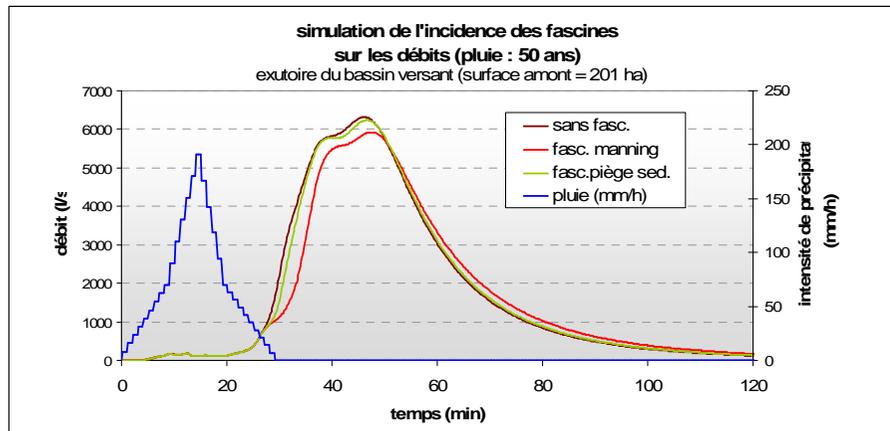
## Hydrogrammes

## Sédigrammes

PLUIE 25 ans



PLUIE 50 ans



PLUIE 100 ans

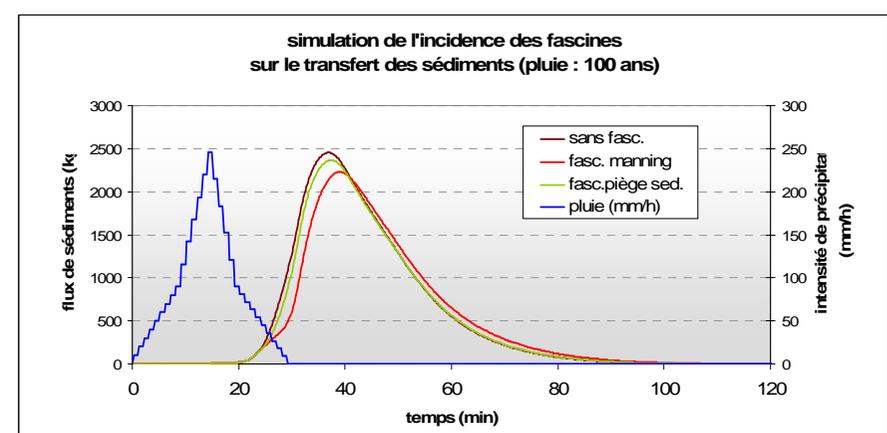
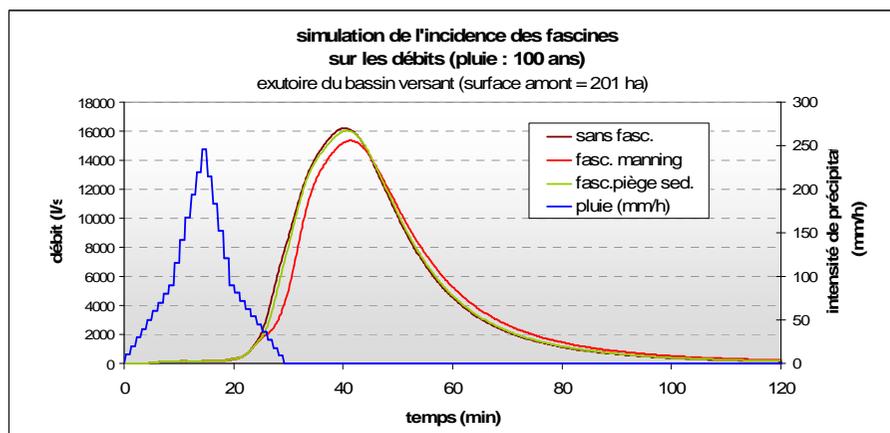


Figure n° 20 : Efficacité des fascines à l'exutoire du bassin versant : Hydrogrammes et Sédigrammes de l'exutoire du bassin versant des différentes pluies (25, 50 et 100 ans)

D'après les figures ci-dessus et le tableau n°9, on ne peut pas conclure sur les facteurs qui influencent le temps de remplissage des fascines. Aucune tendance générale ne ressort. La base de données acquise n'est pas encore assez importante pour pouvoir conclure. Des simulations supplémentaires seront faites durant le mois juillet sur d'autres sites qui permettra d'alimenter notre base de données afin de pouvoir confirmer les observations faites sur ce bassin versant et peut être permettre de conclure sur les points restés en suspens tels que la durée de remplissage des fascines.

pluies	100 ans	50 ans	25 ans	
n° fascine	Temps de remplissage des fascines (min)			taux de remplissage
<b>Indicateur faible</b>				
2	16,5	18,75	-	26%
9	21,75	25,75	-	6%
11	16,5	18,25	-	24%
<b>Indicateur moyen</b>				
4	16,25	18,25	-	69%
5	15,5	16,75	-	35%
6	16,25	18	-	32%
8	9,25	9,5	12,75	
10	17,75	19,75	-	18%
<b>Indicateur Fort</b>				
3	15,5	17,25	-	92%
7	17,75	19,5	-	42%

Tableau n° 9 : tableau récapitulatif du temps de remplissage des fascines

## V.5 Efficacité des fascines au sein du bassin versant

### *Efficacité des fascines mises en place au sein du bassin versant*

L'efficacité des fascines mises en place sur le bassin versant est notable et cela pour les trois types d'événements pluvieux que se soit leur efficacité sur la rétention des sédiments ou sur leur incidence sur les volumes d'eau écoulés (cf. figure n°21). L'efficacité des fascines sur le bassin versant est fonction de l'événement pluvieux, elle diminue en fonction de l'importance de l'événement et cela pour les deux types de modélisation des fascines (cf. figure n°20 et n°21).

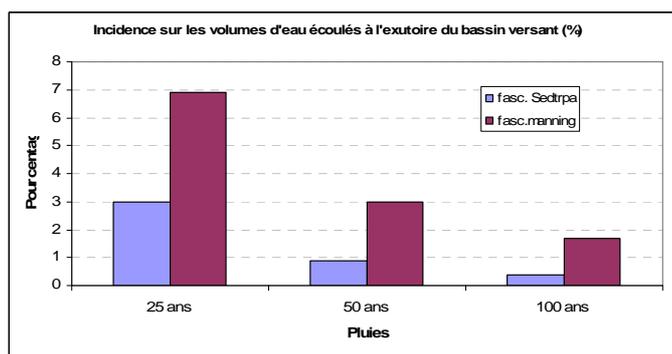
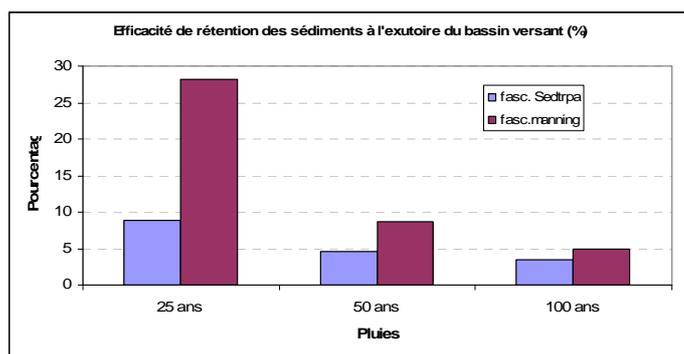


Figure n° 21 : Efficacité de rétention de sédiments des fascines et leur incidence sur les volumes d'eau écoulés à l'exutoire du bassin versant

- L'efficacité de rétention des sédiments des fascines au sein du bassin versant n'est pas la résultante de l'efficacité de chacune des fascines. L'effet sur le bassin versant est moindre. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il y ait eu un phénomène de reprise des sédiments en aval de certaines fascines. Rappelons que le phénomène de reprise est possible lorsqu'une surface sensible se trouve en aval de la fascine.

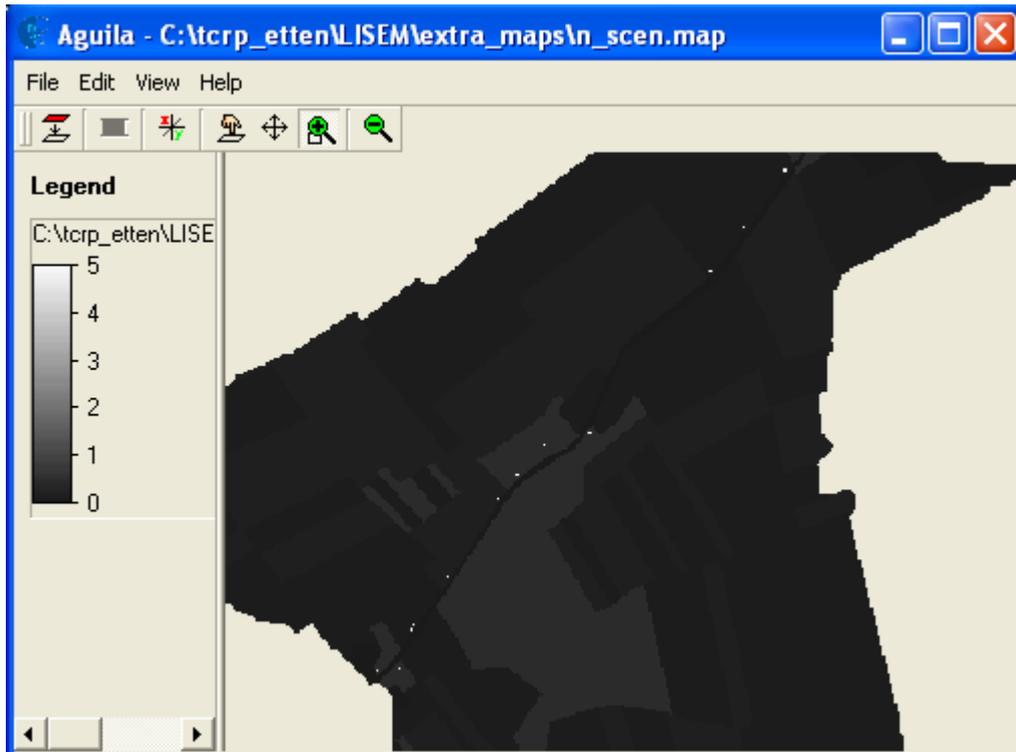


Figure n° 24 : Localisation des fascines pour le scénario « fascines bord de route »

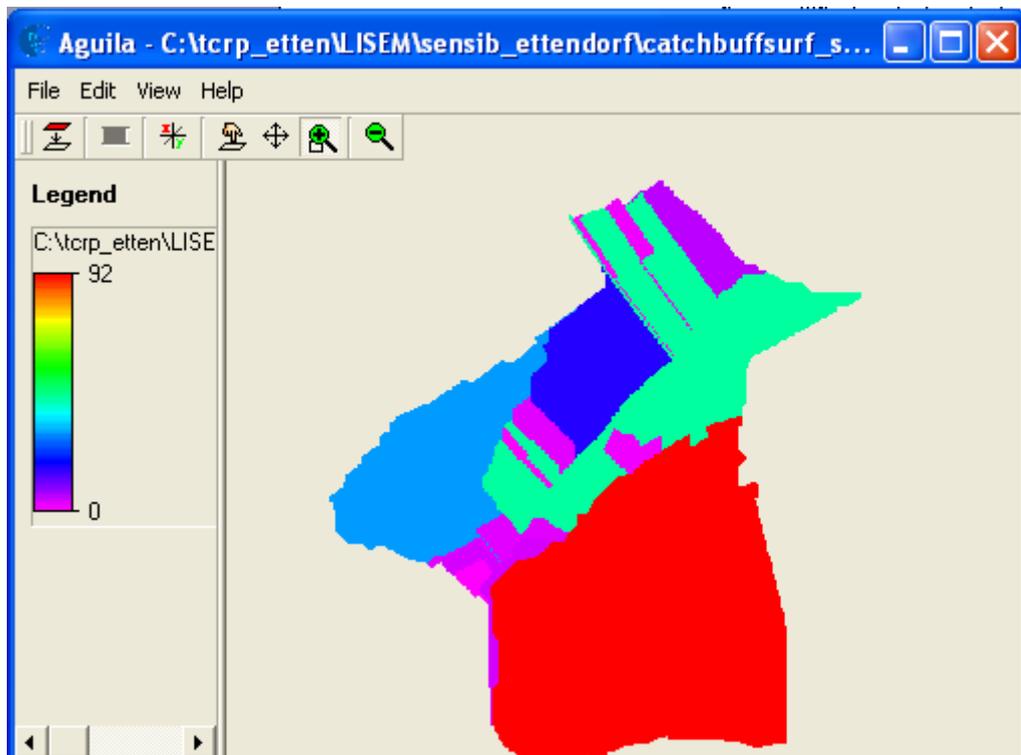


Figure n° 25 : Surface contributive en ha des fascines pour le scénario « fascines bord de route »

Nous avons trois fascines disposées en série dont les surfaces contributives ont une forte, moyenne et faible sensibilité d'apport en sédiment (cf. figure n°22). Comme on peut le constater en aval de la première fascine la surface contributive a une forte sensibilité à l'apport de sédiment : la reprise en charge des sédiments par l'eau est donc favorisée. La même observation se fait pour la deuxième fascine mais dans une moindre mesure puisque la surface à l'aval de cette fascine a une sensibilité moyenne à l'apport en sédiment : la reprise en charge des sédiments est moins favorisée que dans le cas précédent.

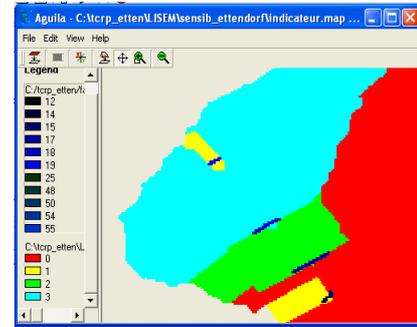


Figure n°22 : fascines en série et Indicateur (jaune : classe 1 ; vert : classe 2 ; bleu : classe 3)

Le phénomène de reprise explique en partie pourquoi l'incidence des fascines sur la quantité de boue à l'exutoire du bassin versant est moindre. Pour une efficacité optimale le réseau de fascines doit être davantage développé sur le bassin versant et prendre en compte le phénomène de recharge possible en aval des fascines.

- L'incidence des fascines sur les volumes d'eau écoulés est faible (elle n'excède pas les 7% pour l'événement pluvieux d'une période de retour de 25 ans) (cf. figure n°19). Tout comme l'incidence des fascines sur l'arrivée des sédiments à l'exutoire, l'efficacité des fascines sur les volumes d'eau écoulés diminue en fonction de l'importance de l'événement pluvieux (cf. figure n°21). Le fait que la quantité d'eau écoulée à l'exutoire soit moins importante montre que les fascines mises en place sur le bassin versant ont permis de favoriser l'infiltration en amont, ce qui est confirmé par les Hydrogrammes de chacune des fascines (cf. figure n°14).

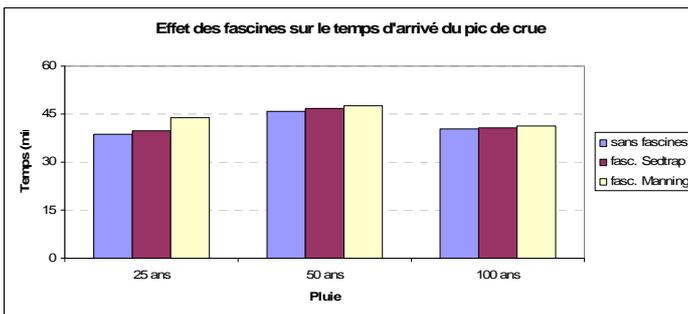


Figure n°23 : Effet des fascines sur le temps d'arrivée du pic de crue

Outre le fait que le débit de pointe soit diminué à l'exutoire grâce à la présence des fascines, le pic de crue est retardé. Ce retard est fonction de l'événement pluvieux : le retard sera d'autant plus marqué que l'événement pluvieux est fréquent (période de retour de 25 ans). Plus l'événement pluvieux devient important (période de retour 50 à 100ans) moins les fascines permettent de retarder l'arrivée des écoulements à l'exutoire.

### Scénario des fascines mises en place en bord de route au sein du bassin versant

Nous avons testé un scénario où les treize fascines seraient en bord de route et non réparties sur tout le bassin versant. Rappelons que la route est le point bas du bassin versant, c'est-à-dire que tous les écoulements sont concentrés sur la route. C'est-à-dire que les écoulements après être passé au travers de la fascine reste sur la route jusqu'à l'exutoire. Ce scénario a été testé dans le but de voir si les fascines étaient plus efficaces lorsqu'il n'y a pas de surfaces sensibles en aval. Ce scénario permet d'éliminer le problème de reprise en charge des sédiments par l'eau après la fascine. La position des fascines du scénario est localisée sur la figure n°24.

Ce que nous constatons c'est que l'incidence sur la quantité de boues à l'exutoire du bassin versant entre la situation réelle et la situation du scénario est similaire à quelques 100<sup>aine</sup> de Kg/ha (cf. tableau n°10). Ce qui implique que les fascines en bord de route ont une efficacité équivalente aux fascines réparties sur tout le bassin versant. Cependant ces fascines ont une surface contributive considérable (de 2ha à 92 ha) (cf. figure n° 25) ce qui peut expliquer qu'elles n'aient pas eu autant d'effet que ce que l'on attendait. En revanche on observe une efficacité plus prononcée concernant l'étalement de crue : le pic de crue est décalé dans le temps de façon plus importante et le pic de débit est atténué (cf. tableau n°10, colonne en bleu).



Méthode Manning Pluie	Total discharge (m3)		Peak discharge (l/s)		Peak time (min)		total soil loss (kg/ha)	
	Réalité	Scénario	Réalité	Scénario	Réalité	Scénario	Réalité	Scénario
25 ans	2548	2674	930	<b>772</b>	43.75	<b>60.5</b>	419	473
50 ans	12087	12294	5925	<b>4703</b>	47.5	<b>56.25</b>	6150	6357
100 ans	26319	26540	15345	<b>11051</b>	41.25	<b>51.75</b>	16442	16803

**Tableau n°10** : Extrait des données obtenues par les simulations du scénario pour les différentes pluies (méthode modélisation fascine méthode Manning)

D'un point de vue général, les fascines ont une incidence plus marquée lorsqu'elles sont disposées en amont de surfaces non érodables. Cependant la mise en place des fascines plus en amont sur l'ensemble du bassin versant est nécessaire. Au contraire, pour que l'effet de chaque fascine ait un effet optimal sur l'exutoire du bassin versant, il faut créer un réseau de fascines sur tout le bassin versant de l'amont en aval. Ce scénario a permis de démontrer que prendre en compte la surface contributive en amont des ouvrages n'est pas suffisant lorsque l'on cherche à les mettre en place, il faut également prendre en compte la surface en aval de la fascine ou la surface entre deux fascines consécutives.

### V.6 Outil d'aide à la décision

Le tableau qui suit est un outil d'aide à la décision qui a été réalisé à partir des données des simulations sur le bassin versant d'Ettendorf. Cet outil a pour but d'aider au moment de la prise de décision de mise en place des fascines. Il permet d'évaluer l'efficacité que pourrait avoir la fascine en fonction du type d'événement pluvieux et du nombre de fascine à mettre en place au sein du bassin versant. Il est composé de trois classes de couleur qui ont été établies à partir des données des simulations des différents événements pluvieux.

La signification des classes est la suivante :

- Blanc : L'efficacité de la fascine varie entre 50% et 100%. Une seule fascine est nécessaire.
- Gris : L'efficacité de la fascine varie entre 25% et 49%. Une seule fascine ne sera pas suffisante. Il faut envisager la mise en place de quelques fascines sur l'ensemble de la surface contributive.
- Noir : L'efficacité de la fascine varie entre 0% et 24%. Un nombre important de fascines réparties sur l'ensemble du bassin versant est nécessaire.

Indicateur Pluies	Faible (0-1)	Moyen (1,-3)	Fort (>3)
25 ans			
50 ans			
100 ans			

## VI. Etude critique et améliorations à apporter

### VI.1. Problème de précision du Modèle Numérique de terrain

Le Modèle Numérique de Terrain fourni par l'Institut Géographique National (IGN) n'est pas très précis. Des corrections ont du être apportées pour avoir des chemins d'eaux conformes à la réalité. Ces corrections se sont basées sur des photos aériennes et des excursions de terrains faites au moment des coulées d'eaux boueuses du 11 mai 2009. Des données topographiques plus précises peuvent être acquises par levés laser aéroportés suivant la technique de télémétrie laser (Jacob A., 2008). De plus un nouveau Modèle Numérique de Terrain de l'IGN plus précis va être mis à disposition prochainement.



## VI.2. Modélisation des fascines

Nous avons rencontrés des problèmes pour la modélisation des fascines. La structure actuelle du LISEM ne permet pas de prendre en compte des objets linéaires fins tels que les fascines. Nous ne disposons pas de données suffisamment précises permettant de paramétrer et de valider les méthodes « *Manning* » et « *Sedtrap* » utilisées dans cette étude. Cependant à ce jour, aucun modèle ne permet de prendre en compte les fascines et leur fonctionnement de manière précise. La raison est qu'actuellement le manque d'information sur le fonctionnement des fascines empêche de quantifier précisément leurs impacts positifs sur la gestion du ruissellement au sein des bassins versants. Une étude, menée par l'AREAS (Association régionale pour l'étude et l'amélioration des sols) en collaboration avec l'ARAA est en cours pour permettre une prise en compte de la présence des aménagements d'hydraulique douce telle que les fascines ou les haies sur un bassin versant dans la modélisation de son fonctionnement hydraulique. Afin d'évaluer l'efficacité des fascines un simulateur de ruissellement sera construit pour :

- Evaluer la réduction des volumes ruisselés ;
- Evaluer le ralentissement des écoulements ;
- Avoir une vision dynamique du comportement des fascines au cours de la crue ;
- Evaluer la réduction de l'érosion et l'épuration des eaux de ruissellement.

Les données expérimentales complétées avec des observations de terrains permettront par la suite de caler les modèles ruissellement/érosion tels que LISEM et STREAM. Néanmoins le calage des modèles ne pourra être réalisé que d'ici 2012.

Cette étude amènera de réelles améliorations des modèles et permettra plus de précision dans les simulations.

## VI.3. Précision de l'indicateur

L'indicateur que nous avons établi est composé de facteurs faciles à déterminer afin qu'il puisse être utilisé dans d'autres régions pour d'autres bassins versants. Cependant il ne prend pas en compte des facteurs ayant une influence non négligeable sur la problématique des coulées d'eaux boueuses. Les facteurs tels que la sensibilité en apport en sédiment des surfaces en aval des fascines ainsi que la répartition des cultures sont importants lors de la prise de décision pour la mise en place des fascines. De plus l'indice du risque d'érosion utilisé n'est valable que lorsque le risque d'érosion est au printemps. Or selon les régions les coulées d'eaux boueuses peuvent se former à la suite d'orage d'hiver, dans ce cas le risque d'érosion hivernal devra être évalué avec un indice de culture modifié.

## VII. Conclusion

Les fascines étudiées ont toutes jouées leurs rôles dans différentes mesures. Les simulations ont permis de mettre en évidence le fait que les fascines implantées actuellement ne permettent pas une efficacité optimale sur l'ensemble du bassin versant. Cependant nous sommes encore au début de la mise en place de ce type de micro-ouvrages au sein des bassins versants. Ce travail va se poursuivre durant les années à venir. De plus les fascines ne sont pas les seules mesures qui sont mises en œuvre pour lutter contre les coulées d'eaux boueuses, l'assolement concerté ainsi que les techniques culturales simplifiées sont les deux autres mesures qui vont se développer durant les prochaines années par la chambre d'agriculture.

Durant juillet 2009, des simulations sur la commune d'Alteckendorf seront faites. Cette commune à la particularité d'avoir au sein d'un même bassin versant des bandes enherbées, des fascines, une bonne alternance des cultures et un champ en TCS. Les simulations nous permettront de voir l'efficacité de la complémentarité de ces mesures.

La partie suivant est consacré à la présentation d'un arbre de décision établit à partir des données acquises par la modélisation LISEM et grâce à une campagne de terrain.



## **Partie III**

### **Modélisation pour l'aide à la décision**



## Notations

$\xi$  = ensemble des objets de la base d'apprentissage

$N$  = nombre d'objet de la base d'apprentissage

$e, e_i$  = objet, objet  $i$  ( $1 \leq i \leq N$ )

$C$  = Ensemble des classes

$n$  = Nombre des classes

$C_i$  = Classe ( $1 \leq i \leq n$ )

$C(e)$  = la classe de l'objet  $e$

$A$  = ensemble d'attributs

$K$  = nombre d'attributs

$A_k$  = attribut  $A_k$  ( $1 \leq k \leq K$ )

$e(A_k)$  = valeur de l'attribut  $A_k$  pour l'objet  $e$

$m$  = nombre de valeurs d'un attribut

$v, v_j$  = valeur de l'attribut considéré, valeur  $j$  de l'attribut considéré ( $1 \leq j \leq m$ )

$P(C_i)$  = probabilité de la classe  $C_i$  dans un ensemble d'objet

$P(v_j)$  = probabilité que l'attribut considéré prenne la valeur  $v_j$

$P(C_i / v_j)$  = probabilité de la classe  $C_i$  conditionnée pour la valeur  $v_j$

$H$  = entropie

$H_q$  = gain ratio

$\log$  = sans précision correspond au logarithme en base 2 : ( $\log_2$ )



## Introduction

L'extraction de connaissances à partir de données, dit apprentissage inductif, est « *un processus non trivial d'identification de structures inconnues, valides et potentiellement utiles dans les bases de données* » (Fayyad et al. 1996). L'apprentissage inductif consiste à extraire un modèle à partir d'une base de données établie sur un ensemble de cas connus. Le modèle qui en découle va alors servir à étudier des cas nouveaux. C'est une technique à la fois descriptive et prédictive (Hawarah L., 2008), qui a pour objectif de déduire des règles à partir d'un ensemble de cas connus, présentées par exemple sous forme d'un arbre. Chacun des cas est décrit par des attributs et les valeurs qui leurs sont associées ainsi qu'une classe (Mitchell, 1997). La structure arborescente décrit les relations entre les attributs et les classes auxquels appartiennent les cas connus répertoriés dans une base de données, appelée base d'apprentissage. Une fois que l'on a déterminé les règles résumant les cas connus, de nouveaux cas peuvent alors être traités et classés (Dang T.H., 2007). Les étapes du processus sont l'acquisition des données nécessaires (base de données), la préparation des données (prétraitement), la fouille des données (data mining), la validation et la mise en forme des connaissances.

Les arbres de décision sont une des techniques les plus populaires pour résoudre les problématiques de classement. Cette technique est qualifiée d'apprentissage inductif supervisé (apprentissage par l'exemple) (Dunham M.H., 2003). La popularité de cette méthode est due en partie à sa simplicité. L'arbre de décision est donc une représentation d'une procédure de décision pour déterminer la classe d'un cas donné. Il est fréquemment utilisé pour représenter des connaissances et permettre d'assister ou même de remplacer un expert humain dans la détermination du classement d'un objet (Dang T.H., 2007).

La structure de l'arbre doit être la plus simple possible pour le rendre plus facilement compréhensible et pour que la phase de classification soit rendue plus rapide.

L'utilisation des arbres de décision est avantageuse (Dunham M.H., 2003) du fait que :

- Les règles obtenues sont relativement faciles à comprendre et à interpréter.
- La complexité des arbres de décisions ne dépend pas du nombre de classes.
- Les traitements des différents types d'attributs (numérique, flou, probabiliste et symbolique) se font de manière homogène. La méthode de construction des arbres s'adapte à différentes situations (données manquantes ou erronées, construction incrémentale des arbres etc.) (Utgoff, 1989). Le peu de contraintes sur les données permet une utilisation des arbres dans de nombreux domaines.
- Les attributs sont ordonnés selon leur influence sur la classe des cas, ce qui permet de déterminer l'attribut décisif (racine de l'arbre).

En revanche, comme pour la plupart des méthodes de classement, cette méthode présente certains inconvénients (Dunham M.H., 2003) :

- Il est nécessaire d'évaluer tous les attributs à chaque nœud pour choisir le plus adéquat.
- Les arbres de décisions sont moins performants quand on a peu de cas et plusieurs classes.
- Trop de données peuvent entraîner un phénomène de sur-apprentissage.
- L'espace des données est découpé en hypercubes rectangulaires. Les arbres de décisions sont moins performants si les classes ne sont pas bien séparées par de telles surfaces.

## I. Arbre de décision

### I.1. Notions et types de données

#### I.1.1. Notions

**Nœud** : Chaque nœud correspond à une question (test) sur un attribut et à un ensemble d'exemple. On assigne à chaque nœud un attribut.



**Branche** : Chaque branche part d'un nœud et correspond à une réponse possible à la question posée à ce nœud. On assigne à chaque branche les différentes valeurs que prend l'attribut. Selon les méthodes le nombre de branches par nœud varie de 2 à autant de valeurs que possibles pour l'attribut étudié.

**Feuilles pures** : nœud d'où ne part aucune branche. Correspond à une classe.

La figure n°1 est un exemple qui illustre les notions principales des arbres de décision : nœud, branches et feuilles pures.

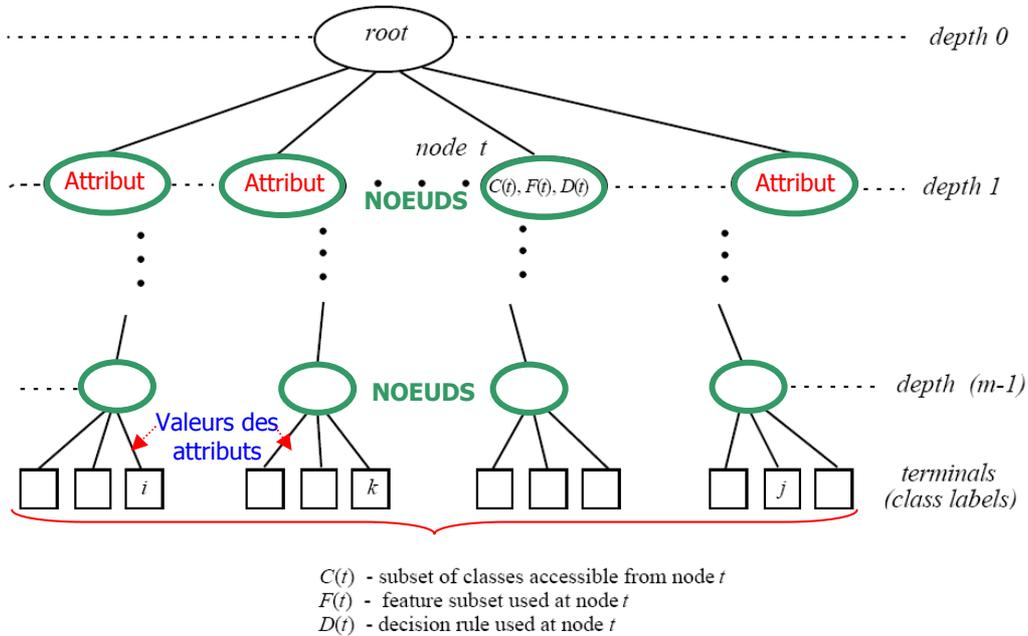


Figure n°26 : Exemple d'arbre de décision. Source : Safavian & Landgrebe, 1991

En général, à chaque nœud interne de l'arbre, un test correspondant à un attribut de la base de données est réalisé. Les branches de l'arbre correspondent à chacune des valeurs possibles des différents attributs. Un chemin de la racine à un nœud correspond à une série d'attribut (tests ou questions) avec les valeurs des attributs (réponses). La construction d'un tel arbre sera développée plus en détail dans le paragraphe III.

Ci-dessous un exemple de base de données avec les quelques paramètres physiques concernant notre problématique afin d'illustrer mes propos et un exemple d'arbre qui pourrait en découler.

NB : les données dans le tableau sont factices et présentées à titre d'exemple pour illustrer mes propos.

Attributs				
N°fascine	indicateur	événement pluvieux	type de culture en aval	mise en place
1	faible	25	printemps	une
2	faible	25	hiver	une
...	...	...	...	...
8	moyen	25	hiver	une
9	moyen	50	hiver	quelques-unes
10	moyen	50	printemps	plusieurs
...	...	...	...	...
18	fort	100	hiver	plusieurs

{ Cas
{ Valeurs des attributs
{ Feuilles pures ou classe



### I.1.2. types de données

Dans une base de données on trouve divers types de d'attributs. Il existe deux grands types :

- **Qualitatif** (symbolique) : si l'ensemble des valeurs que prend l'attribut n'est pas de type numérique. Cela peut être la forme du bassin versant, le type de culture, etc... les attributs qualitatifs peuvent être nominaux ou ordinaux.
- **Quantitatif** (numérique) : si l'ensemble des valeurs que prend l'attribut est un nombre fini ou infini ou encore un intervalle de valeurs réelles. L'attribut de type numérique peut être discret ou continu selon qu'il est de nature fini ou indénombrable.

Cependant on peut transformer des données qualitatives en données quantitatives et inversement. Le tableau ci-dessous résume les différents types d'attributs que l'on peut rencontrer :

Attribut qualitatif (Symbolique)		Attribut quantitatif (Numérique)	
Nominal	ordinal	Continu (ensemble indénombrable)	Discret (ensemble fini)
{OUI; NON}	{faible ; fort}	Surface amont de la fascine (ha)	Evénement pluvieux {25, 50,100}

### I.2. Construction d'un arbre de décision

Construire un arbre de décision consiste à diviser récursivement les données de l'ensemble d'apprentissage en utilisant des tests (questions) définis à l'aide des attributs jusqu'à ce que l'on obtienne des feuilles pures ne contenant –idéalement– que des objets appartenant tous à la même classe. Le choix de l'attribut pour l'affecter à un nœud et pour partitionner la base de données est le cœur du processus de construction d'un arbre de décision. Il s'agit de trouver un partitionnement des données que l'on représente sous forme d'arbre de décision.

La conception d'un arbre de décision se décompose selon les étapes suivantes :

1. Sélectionner un attribut et l'assigner au nœud courant ;
2. Partitionner les cas dans des sous-ensembles selon les valeurs de cet attribut ;
3. Créer des nouveaux nœuds pour chaque sous-ensemble non vide de la partition et leur attribuer un attribut ;
4. Répéter la procédure pour chacun des nœuds.

La procédure s'arrête si tous les éléments du nœud sont dans la même classe alors le nœud devient une feuille pure correspondant à une classe.

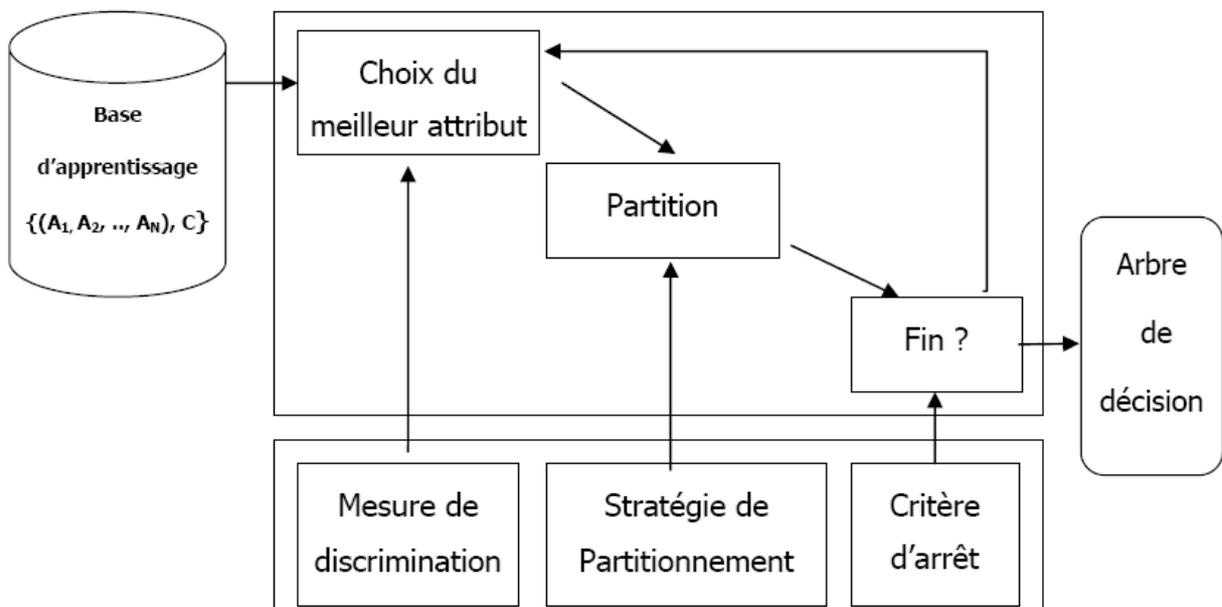


Figure n°27 : Conception d'un arbre de décision. Source : Dang T.H., 2007



L'objectif du partitionnement de la base de données est de produire des groupes des données les plus homogènes possibles et d'obtenir l'arbre le plus simple et le plus petit possible. Pour chacun des attributs on va regarder l'homogénéité des classes qu'il va produire, l'attribut qui produira le plus de groupes de données homogènes sera choisi pour être le prochain nœud de l'arbre. Le processus est réitéré pour chaque nouveau nœud et il s'arrête lorsque les feuilles appartiennent à une seule classe ou qu'aucune amélioration ne peut être apportée à l'arbre (*Rakotomalala, 2005*). Le processus est modélisé par différents algorithmes implantés dans des boîtes à outils telles que WEKA. Il en existe plusieurs (cf. II.2.3), en fonction de l'algorithme choisi on obtient différents arbres en sortie. Le concept utilisé pour quantifier l'information est appelé « Entropie » (cf. II.2.2).

Par la suite le choix de l'arbre se fait principalement selon son degré de complexité. L'idée centrale de la construction d'un arbre de décision est d'obtenir un arbre dont la structure est la plus simple possible (d'après le principe d'Occam<sup>3</sup>). Les arbres simples sont plus facilement compréhensibles, ont de meilleures capacités de généralisation et rendent la phase de classification plus rapide. La complexité des arbres est évaluée par le nombre de nœuds, le nombre de feuilles, le nombre d'attributs utilisés et la hauteur de l'arbre. Le nombre d'arbres va croître de façon exponentielle en fonction du nombre d'attributs et le nombre de valeurs possibles par attribut.

### I.2.1. Différentes stratégies de construction d'un arbre de décision

Différentes stratégies existent pour construire les arbres de décision (cf. II.1.). Cependant, trois opérations sont communes à toutes ces méthodes (divide-and-conquer strategy) (*Quinlan, 1993 ; Safavian & Landgrebe, 1991*) :

- Décider si un nœud est terminal ;
- Sélectionner un test à associer à un nœud ;
- Affecter une classe à une feuille.

Les différentes stratégies de construction d'un arbre de décision peuvent être divisées en quatre grandes catégories (*Safavian & Landgrebe, 1991 ; Dunham, 2003*) :

- Bottom-Up (*Landeweerd et al., 1983*) : Cette approche consiste à calculer la distance entre les différents cas de la base de donnée. Les deux groupes dont la distance est la plus petite, vont être fusionnés pour former un nouveau groupe. Cette phase de fusion est réitérée jusqu'à l'obtention d'un groupe unique qui est alors la racine de l'arbre (root). L'arbre qui découle de cette méthode est un arbre binaire (cf. classification hiérarchique).
- Top-Down : la conception de l'arbre se fait depuis la racine vers les feuilles pures (étiquettes) en partitionnant successivement la base de données. Le processus s'arrête lorsque les critères d'arrêt sont vérifiés pour toutes les feuilles de l'arbre. Cette stratégie dite induction descendante d'arbre de décision (Top Down Induction of Decision Tree : TDIDT), est la plus populaire et la plus utilisée. Les méthodes ID3 (Interactive Dichotomizer version 3), CART (Classification and Regression Tree) et C4.5 sont les méthodes Top-down les plus utilisées.
- Hybride : les deux approches précédentes sont utilisées dans cette stratégie. Les processus de la méthode Bottom-Up fournissent des informations sur des groupes qui sont par la suite exploitées par les processus de la méthode Top-Down pour partitionner la base de données.
- Growing-Pruning : cette approche consiste à développer un arbre de taille maximale et d'en élaguer les branches par la suite. Cette approche permet d'éviter les difficultés du choix de critère d'arrêt.

---

<sup>3</sup>Principe d'Occam : "les entités ne devraient pas être multipliées sans nécessité." [...] "Quand on a deux théories en compétition qui permettent de prédire exactement les mêmes choses, celle qui est la plus simple est la meilleure. (Hawarah, 2008)



### I.2.2. Sélection des attributs

Une des étapes essentielle dans la conception des arbres de décision est la sélection des attributs. La principale différence entre les différentes méthodes de construction des arbres réside dans cette étape. Le choix des attributs repose sur deux catégories de critères (*Rabaséda, 1996*) :

- Critères variés dont les critères statistiques.
- Critères provenant de la théorie de l'information<sup>4</sup> qui reposent sur des calculs d'Entropie dont le principe est que l'attribut choisi doit permettre de réduire le plus possible l'incertitude dans laquelle on se trouve lors de l'identification des classes des cas. L'Entropie d'une variable (ici d'un attribut) est la mesure de son degré d'incertitude. Parmi les calculs d'Entropie les plus connus on peut citer : l'Entropie de Shannon, l'Entropie de Darcóczy et l'Entropie de Rényi.

« Dans la théorie de l'information, les concepts de quantité d'information et de quantité d'incertitude sont équivalents. Si on a une source d'information (S, P) où le choix d'un élément de S a une probabilité P, la probabilité de choisir  $x_i$  est  $P(x_i)$ . Avant que l'événement  $x_i$  ne se produise, on a une quantité d'incertitude sur son résultat, et après l'exécution de cet événement, on a une quantité d'information gagnée sur la source. Par exemple : si  $P(x_1) = 1$  et  $P(x_i) = 0$  pour  $i > 1$  alors  $x_1$  est toujours choisi ; dans ce cas, on n'a pas d'incertitude et on n'a pas non plus d'information. Shannon utilise les concepts de quantité d'information, de liberté de choix et d'incertitude, de manière équivalente. La quantité d'information moyenne mesure le nombre minimum de bits (**B**inary **d**igit = alternative entre deux termes équiprobable qui apporte une unité d'information) nécessaires en moyenne pour coder de façon binaire les symboles émis par une source. La quantité d'information associée à un événement peut également être vue comme une mesure de la réduction de l'incertitude suite à l'observation d'un événement » [*Roman, 1992*].

Dans les paragraphes suivants sera traitée uniquement la sélection des attributs par calcul d'Entropie.

#### I.2.2.1. Définitions de l'Entropie et de l'Information Mutuelle

##### I.2.2.1.1. Entropie : ( $H$ )

La notion d'Entropie a été introduite pour la première fois dans la théorie de l'information par Shannon en 1948. Par la suite cette notion a été reprise dans la méthode de l'algorithme ID3 (cf. §III.3.1.) pour sélectionner le meilleur attribut. L'Entropie permet à la fois de mesurer la quantité d'incertitude dans une base de données avant un échantillonnage et la quantité d'information obtenue lors d'un échantillonnage. L'Entropie de Shannon est l'une des plus utilisées pour la sélection des attributs.

L'Entropie, notée  $H$ , est la quantité d'information associée à un événement de probabilité  $p_i$ . On la définit par l'expression :

$$H = -\log P(p_i) \quad \text{Expression 1}$$

L'entropie d'un ensemble d'événement D associé aux probabilités  $p_1, p_2, \dots, p_i$ , où  $\sum p_i = 1$ , est défini par l'expression 2 :

$$H(D) = -\sum_i p_i \log p_i \quad \text{Expression 2}$$

---

<sup>4</sup> Théorie de l'information est due à Shannon C. en 1948 : fondée sur des modèles probabilistes. Elle relate du problème de communication entre une source et un récepteur : la source émet un message que le récepteur lit. La théorie de l'information permet de quantifier l'information transmise. La théorie de l'information est à l'origine de la notion d'entropie.



### Propriétés :

- l'Entropie augmente quand le nombre de valeur possible augmente ;
- L'incertitude de l'attribut X est la plus grande si toutes les valeurs possibles de X ont une même probabilité de se réaliser. Dans ce cas :

$$H(X) = -\sum_i P(x_i) \log P(x_i) = -\sum_i \left(\frac{1}{n}\right) \log(1/n) = \log(1/n) \quad \text{Expression 3}$$

Associé à la notion d'Entropie, l'Entropie conditionnelle représente l'Entropie d'un événement sous certaines conditions. Le calcul de l'Entropie conditionnelle permet donc de connaître la quantité d'information apportée par la réalisation d'un attribut  $A_j$  sachant qu'un autre attribut, attribut  $A_i$ , est réalisé. C'est-à-dire que l'on va calculer l'Entropie d'un attribut  $A_j$  d'une sous-base d'apprentissage  $S$  associée au nœud assigné à l'attribut  $A_i$ . L'Entropie conditionnelle est notée  $H(S/A_i)$ , où  $S = \{C_j\}$  sa formule est la suivante :

$$H(S/A_i) = -\sum_i \sum_j P(C_j/A_i) \log P(C_j/A_i) \quad \text{Expression 4}$$

Lors de la construction de l'arbre de décision l'entropie conditionnelle intervient dans les étapes de :

- Discrétisation des attributs ;
- Sélection du meilleur attribut parmi un ensemble d'attributs possibles. L'attribut sélectionné sera celui qui permet le gain d'information le plus important
- Partition de la base d'apprentissage ;
- Etablissement des critères d'arrêt de l'arbre (cf. III.4.).

L'Entropie jointe, notée  $H(X, Y)$ , permet de calculer la quantité d'information moyenne apportée par la réalisation de deux événements X et Y. Plus précisément, c'est la quantité d'information réellement apportée par Y si on connaît X :

$$H(X, Y) = H(Y/X) + H(X) = H(X/Y) + H(Y) \quad \text{Expression 5}$$

#### I.2.2.1.2. Information Mutuelle

Nous venons de voir que l'Entropie d'un attribut est la mesure de son degré d'incertitude. La quantité d'information obtenue sur un attribut permet donc de diminuer l'incertitude de celui-ci. En d'autre terme, mesurer la diminution de l'entropie d'un attribut revient donc à quantifier l'information sur l'attribut. Précédemment, nous avons vu que l'Entropie conditionnelle  $H(X/Y)$  est la quantité d'information sur l'attribut X que l'on recherche lorsque l'on connaît les informations pour l'attribut Y. En d'autres termes l'information de l'attribut Y permet d'augmenter l'information sur l'attribut X, l'incertitude sur l'attribut X est réduite. L'information que l'on peut gagner sur un attribut par l'intermédiaire de l'entropie est appelée « Information Mutuelle» (Shannon, 1948).

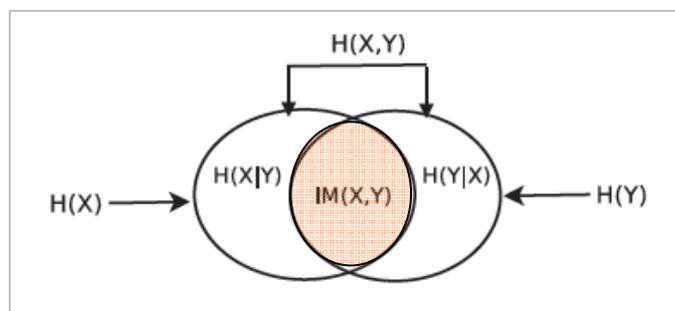


Figure n° 28 : Information Mutuelle. Source : Hawarah, 2008

<sup>5</sup> Rappel Probabilité Conditionnelle :  $p(A/B) = [p(B/A) \times p(A)] \div p(A)$



L'utilisation de l'Information Mutuelle (IM) permet d'évaluer l'importance de chaque attribut au sein de la base d'apprentissage. Elle représente la quantité d'information présente « en double » dans X et Y. La quantité d'information sera d'autant plus importante que l'événement sera improbable. En d'autre terme, l'IM permet de choisir le meilleur attribut lors de la construction de l'arbre de décision en mesurant le degré de dépendance entre deux attributs. La dépendance entre deux attributs sera d'autant plus forte que l'IM sera élevée et inversement. Par exemple, si la dépendance entre deux attributs, X et Y, est forte alors la quantité d'information demandée pour réaliser X diminue lorsque l'information sur Y est connue. L'Information Mutuelle est illustrée par la figure n°2 et s'exprime par la formule suivante :

$$IM(X, Y) = H(Y) + H(X) - H(X, Y) \quad \text{Expression 6}$$

La quantité d'information obtenue dépend à la fois du nombre de valeurs que possède un attribut et à la distribution de ces valeurs. Cependant, plus un attribut a de valeurs plus son Information Mutuelle a tendance à être élevée (Crémilleux, 1991). Ce qui implique que l'Information Mutuelle va privilégier les attributs possédant de nombreuses valeurs. Ce qui pose problème concernant les attributs qui en possèdent un nombre réduit car ils sont considérés comme peu pertinents. Or le nombre de valeurs d'un attribut n'est pas lié à la pertinence de celui-ci pour le classement. Une des solutions possibles pour rendre insensible l'IM au nombre de valeurs par attribut est de la normaliser. Parmi les méthodes de normalisation l'une des plus connues est celle proposée par J. Ross Quinlan en 1993, utilisant le gain rationnel et qui consiste à diviser l'Information Mutuelle par l'Entropie de l'attribut que l'on teste. Cette méthode n'est valable que si l'Entropie de l'attribut n'est pas nulle (Quinlan, 1993).

#### I.2.2.1.3. Gain d'entropie

Le gain d'entropie mesure la réduction d'Entropie apportée par la partition d'un ensemble sur la base d'un attribut. En d'autres termes, si on veut faire une segmentation d'un ensemble d'événements probabilité  $p_i$  alors on peut choisir la meilleure segmentation en fonction du gain d'entropie par rapport à l'ensemble de départ. L'information que l'on peut gagner est appelée gain d'information, noté  $Gain(D, S)$  est défini par :

$$Gain(D, S) = H(D) - \sum_{j=1}^s P(D_j)H(D_j) \quad \text{Expression 7}$$

Où  $S$  est une segmentation de  $D$  en  $s$  sous ensemble  $D_j$

$H(D)$  est l'Entropie avant la segmentation

$P(D_j)$  est la probabilité des sous-ensembles

$H(D_j)$  est l'Entropie des sous-ensembles.

} Correspond à l'Entropie après la segmentation

Propriétés :

- Le gain d'entropie est nul si  $S$  apporte peu d'information à la classe ;
- Le gain d'entropie est maximum lorsque l'Entropie conditionnelle est minimale :

$$Gain(D, S) = \max imum \Leftrightarrow H(D/S) = \min imum$$



### I.2.3. Exemple

Considérons la base de données du tableau n°11. Pour construire l'arbre de décision à partir de la base de données du tableau suivant, on va chercher l'attribut le plus pertinent qui maximise le gain d'information (cf. expression 3, p33).

N°fascine	indicateur	événement pluvieux	type de culture en aval	mise en place
1	faible	25	printemps	une
2	faible	25	hiver	une
3	faible	50	hiver	une
4	faible	50	printemps	quelques-unes
5	faible	100	printemps	quelques-unes
6	faible	100	hiver	quelques-unes
7	moyen	25	printemps	quelques-unes
8	moyen	25	hiver	une
9	moyen	50	hiver	quelques-unes
10	moyen	50	printemps	plusieurs
11	moyen	100	printemps	plusieurs
12	moyen	100	hiver	quelques-unes
13	fort	25	printemps	plusieurs
14	fort	25	hiver	plusieurs
15	fort	50	hiver	plusieurs
16	fort	50	printemps	plusieurs
17	fort	100	printemps	plusieurs
18	fort	100	hiver	plusieurs

Tableau n°11 : base de données : mise en place fascines

$$\begin{aligned} \text{Gain}(\text{miseenplace}, \text{indicateur}) &= H(\text{Miseenplace}) - H(\text{miseenplace} / \text{indicateur}) = 1,529 - 0,508 = 1,021 \\ \text{Gain}(\text{miseenplace}, \text{cultureaval}) &= H(\text{Miseenplace}) - H(\text{miseenplace} / \text{cultureaval}) = 1,529 - 1,502 = 0,027 \\ \text{Gain}(\text{miseenplace}, \text{pluie}) &= H(\text{Miseenplace}) - H(\text{miseenplace} / \text{pluie}) = 1,529 - 1,234 = 0,295 \end{aligned}$$

L'attribut qui maximise le gain d'information est l'attribut *indicateur*. De ce fait, l'attribut *Indicateur* est désigné comme étant la racine de l'arbre. La base de données est alors partitionné en trois sous-ensembles (qui sont des branches de l'arbre) selon les valeurs de l'attribut *Indicateur* : *faible*, *moyen* et *fort*. Les trois sous-ensembles qui découlent de cette première partition sont donnés dans les tableaux 11.1, 11.2 et 11.3.

La construction de l'arbre se poursuit en réitérant le processus en choisissant d'autres attributs les plus pertinents pour chacun des sous-ensembles. Le processus de construction de l'arbre s'arrête lorsque on attribut à toutes les feuilles de l'arbre obtenu une conclusion. Autrement dit on cherche à attribuer une étiquette à chaque feuille, dans notre cas les étiquettes ont les valeurs : *Une*, *quelques-unes* et *plusieurs*.

N°fascine	indicateur	événement pluvieux	type culture en aval	mise en place
1	<b>faible</b>	25	printemps	une
2	<b>faible</b>	25	hiver	une
3	<b>faible</b>	50	hiver	une
4	<b>faible</b>	50	printemps	quelques-unes
5	<b>faible</b>	100	printemps	quelques-unes
6	<b>faible</b>	100	hiver	quelques-unes

Tableau n°11.1 : sous-ensemble associé à la valeur *Faible* d'*Indicateur*

N°fascine	indicateur	événement pluvieux	type culture en aval	mise en place
7	<b>moyen</b>	25	printemps	quelques-unes
8	<b>moyen</b>	25	hiver	une
9	<b>moyen</b>	50	hiver	quelques-unes
10	<b>moyen</b>	50	printemps	plusieurs
11	<b>moyen</b>	100	printemps	plusieurs
12	<b>moyen</b>	100	hiver	quelques-unes

Tableau n°11.2 : sous-ensemble associé à la valeur *Moyen* d'*Indicateur*



N° fascine	indicateur	événement pluvieux	type de culture en aval	mise en place
13	fort	25	printemps	plusieurs
14	fort	25	hiver	plusieurs
15	fort	50	hiver	plusieurs
16	fort	50	printemps	plusieurs
17	fort	100	printemps	plusieurs
18	fort	100	hiver	plusieurs

Tableau n°11.3 : sous-ensemble associé à la valeur *Fort* d'Indicateur

Dans le tableau n° 11.3 on remarque que tout les cas de ce sous-ensemble appartiennent à la classe *plusieurs*. Pour ce sous-ensemble le processus de partitionnement s'arrête. Cette branche de l'arbre possède une feuille pure étiquetée *plusieurs*.

En revanche le partitionnement se poursuit pour les deux autres sous-ensembles :

Lorsque l'on prend comme exemple le sous-ensemble correspondant à la valeur *moyen* de l'attribut *Indicateur* (cf. tableau 11.2), l'attribut le plus pertinent est *événement pluvieux*, le nouveau sous-ensemble qui en découle est alors partitionné en deux sous-ensembles qui ont les valeurs  $\leq 25$  et  $> 25$ . Il en va de même pour le sous-ensemble correspondant à la valeur faible de l'attribut indicateur (cf. tableau 11.2).

L'arbre de décision final qui découle du partitionnement de la base de données est :

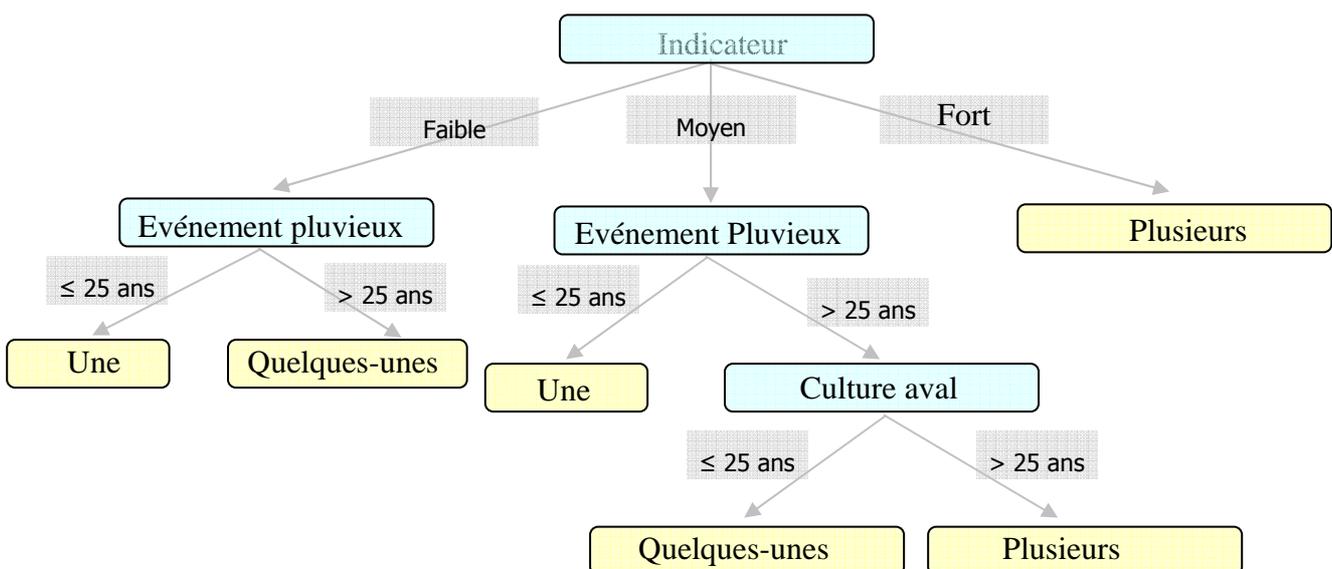


Figure n°29 : Arbre de décision

#### I.2.4. Algorithmes d'induction : schéma TDIDT

Les algorithmes sont une liste d'instructions qui permettent de construire les arbres de décision. Il en existe plusieurs (*Lim, 2000 ; Safavian et Landgrebe, 1991 ; Dunham, 2003 ; Hawarah, 2008*), cependant la plupart de ces algorithmes font partie de la catégorie TDIDT (Top Down Induction of Decision Tree). Parmi les plus connus, on peut citer ID3, C4.5.

##### I.2.4.1. Algorithme ID3

Cette méthode consiste à créer tous les arbres possibles qui permettent de classer correctement la base de données et ensuite de choisir l'arbre le plus simple (principe du rasoir d'Occam). Le nombre d'arbres qui découle de cette méthode peut être très grand mais il reste fini. C'est une méthode itérative.



La méthode commence par le choix aléatoire d'un sous-ensemble de la base de données, appelé « Fenêtre » (Windows). L'arbre de décision est construit à partir de cette fenêtre. On va alors chercher à classer correctement le reste des objets de la base de données à l'aide de l'arbre. Lorsque que tous les objets de la base de données sont classés correctement, l'arbre est considéré comme correct pour l'ensemble des données et le processus s'arrête. En revanche, si certains objets ne sont pas classés correctement alors ils sont placés dans la fenêtre et le processus continue. Un nouvel arbre doit alors être construit. Cette méthode permet d'obtenir un arbre de décision correct après quelques itérations.

L'algorithme ID3 sélectionne les attributs par le calcul de l'Entropie (*Dunham, 2003*) cf. §II.3.

#### I.2.4.2. Algorithme C4.5

C4.5 est une extension de l'algorithme de base ID3. Il s'effectue en deux étapes :

- Construction de l'arbre en entier en partitionnant successivement la base de données ;
- Phase d'élagage de l'arbre (cf. III.5). Les branches de l'arbre qui augmentent le taux d'erreurs de classement de l'arbre de décision sont élaguées.

L'algorithme C4.5 sélectionne les attributs à l'aide du ration du gain ( $Hq$ ) :

$$Hq(S, A) = \frac{H(S, A)}{H(A)}$$

$$\text{Où } H(A) = -\sum_i P(C_j) \log P(C_j)$$

#### I.2.4.3. Algorithme J48

Actuellement on utilise l'algorithme J48 qui est une implémentation améliorée et plus récente de l'algorithme C4.5 présente dans le logiciel WEKA (Waikato Environment of Knowledge Analysis) (<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>) (*Quinlan, 1993*). C'est cet algorithme qui sera utilisé pour notre étude.

#### I.2.5. Critères d'arrêt de construction d'un arbre

Différents critères permettent d'arrêter la construction d'un arbre de décisions. Ces critères sont appelés « critères d'arrêt ». Les principaux critères d'arrêt sont :

- Tout les attributs sont utilisés ;
- La hauteur de l'arbre atteint une limite fixée par le nombre d'attributs ;
- Le nombre de feuilles pures atteint un maximum fixé ;
- Le nombre d'instances par nœuds est minimum à un seuil fixé ;
- Le gain d'information obtenu est inférieur à un seuil fixé ;
- La qualité de l'arbre n'augmente pas de façon perceptible. Autrement dit, aucun attribut n'améliore la qualité de l'arbre.

Le premier critère favorise les feuilles avec peu d'éléments, ce qui a pour conséquence de diminuer de façon notable la fiabilité de l'arbre lors du classement d'un nouveau cas.

#### I.2.6. Elagage

##### I.2.6.1. Pré-élagage (stopping)

Rappelons que l'idée centrale de la construction d'un arbre de décision est d'obtenir un arbre dont la structure est la plus simple possible (d'après le principe d'Occam) et le plus performant. De plus, la performance d'un arbre est liée à sa taille. Il est avéré que le taux d'erreur de classification dépend de la taille de l'arbre (*Rakotomalala, 2005*). Il a tendance à diminuer lorsque la taille de l'arbre augmente. Néanmoins au-delà d'une certaine taille, le phénomène de sur-apprentissage apparaît et le taux d'erreur augmente. Il n'existe pas d'arbre optimal pour classer parfaitement la base de données. La



recherche de la taille optimale d'un arbre se fait par des phases de pré-élagage (stopper la construction de l'arbre) et par des phases de post-élagage (réduire l'arbre).

La phase de pré-élagage consiste à établir des règles pour stopper la construction de l'arbre même si les feuilles ne sont pas pures. Autrement dit, les règles établies permettent de stopper ou de continuer de développer certains nœuds de l'arbre (*Quinlan, 1993*). Il existe différentes méthodes de pré-élagage.

Une de ces méthodes consiste à fixer un critère d'arrêt local (cf.III 4) c'est-à-dire sur le nœud que l'on est en train d'étudier. Ce critère d'arrêt permet d'évaluer le gain d'information si l'on continue à développer le nœud. Le nœud est développé si le gain d'information obtenu dépasse le seuil que l'on a fixé par le critère d'arrêt sinon on s'arrête et on le remplaçant par une feuille. Une autre méthode qui a prouvé son efficacité est la méthode dite *ad-hoc* basée sur des seuils empiriques (*Rakotomalala, 2005*). En deçà des seuils le développement du nœud est stoppé.

D'autres méthodes existent telles que la méthode basée sur le test du khi-deux néanmoins elles ne sont pas satisfaisantes du fait de leur complexité ou de leurs résultats peu satisfaisants.

#### I.2.6.2. Post-élagage

Contrairement à la technique de pré-élagage, on construit l'arbre en entier puis par la suite on l'élague en calculant le taux d'erreur de classement. Cette méthode s'est développée avec l'algorithme CART. Le post-élagage consiste à simplifier l'arbre de décision en supprimant certaines branches et en les remplaçant par des feuilles. Le processus d'élagage commence par les feuilles pures de l'arbre et on remonte vers la racine. Il existe différentes méthodes de post-élagage. Parmi les plus connues, on peut citer les méthodes basées sur des estimations non-biaisées du taux d'erreur de classement. Certaines méthodes calculent le taux d'erreur sur un même échantillon (méthode de l'algorithme C4.5, J48) ou sur un deuxième échantillon dit de validation (méthode de l'algorithme CART) (*Kohavi and Quinlan, 1999*).

#### I.2.6.3. Décision

C'est l'étape finale de la construction de l'arbre de décision : on attribut une conclusion à chaque feuille de l'arbre qu'elles soient pures ou non. Autrement dit on cherche à attribuer une étiquette à chaque feuille.

Dans le cas des feuilles pures la conclusion est la modalité unique que cette feuille contient. Pour exemple le tableau suivant, Les données du tableau sont fictives et données à titre d'exemple :

N°	Prémisse	Conclusion
1	Indicateur= « faible » ; surface aval=« hiver » et pluie = « 25 »	Fascine = « Une »
2	Indicateur= « moyen » ; surface aval=« hiver » et pluie = « 50 »	Fascine = « quelques-unes »
3	Indicateur= « fort » ; surface aval=«printemps» et pluie = «100»	Fascine = « plusieurs »

Dans le cas de feuilles présentant plusieurs modalités la conclusion n'est pas évidente. Une règle d'attribution doit être utilisée. La plus connue est la règle de majorité : l'étiquette que l'on attribut à la feuille correspond à la modalité qui présente le plus de valeurs.

#### I.2.7. Classement

Le processus de classement se fait de la racine de l'arbre jusqu'à une feuille pure. A partir de la racine de l'arbre on descend de nœud en nœud selon les valeurs des attributs jusqu'à une feuille pure de l'arbre. La classe associée à cette feuille pure sera la classe de l'objet en que l'on cherche à classer.

#### I.2.8. Conclusion

Les arbres de décisions seront établis sous WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis) qui est un outil permettant d'exécuter des algorithmes de data-mining (fouille de données) sur un



ensemble de données. Dans notre cas, l'algorithme qui sera utilisé pour la conception de l'arbre est l'algorithme J48. Le choix de l'algorithme s'est arrêté sur l'algorithme J48 pour les raisons suivantes :

- Les algorithmes ID3 et C4.5 sont des versions trop anciennes ;
- L'algorithme J48 est l'un des algorithmes les plus performants et l'un des plus récents (information transmise par A. Brand, LSIIT) ;

## **II. Conclusion**

Dans le temps qui m'était imparti, je n'ai pu réaliser une base de données permettant de réaliser un arbre de décision opérationnel. De plus nous n'avons pas encore assez de recul pour observer le fonctionnement et l'efficacité des fascines. Un inventaire des fascines dans les différentes régions de France sera réalisé dans les prochains mois. La base de données pourra alors s'étoffer et permettra la construction d'un arbre de décision plus précis. Cependant l'exemple d'arbre de décision utilisé dans cette partie n'a pas été pris en hasard : les attributs choisis sont des facteurs essentiels à prendre en compte lors du positionnement des fascines, on va chercher à avoir ce type d'arbre de décision par la suite.

En revanche un paramètre primordial n'a pas été pris en compte dans cet arbre : l'exploitant. L'implantation et le dimensionnement des fascines se font en négociation avec les exploitants. L'acceptation des fascines par l'exploitant est fonction de nombreux paramètres « humains » tels que sa sensibilité personnelle à la problématique et les relations humaines entretenues entre exploitants et exploitants-élus ou encore exploitants-riverains. Lorsque l'exploitant est contre l'implantation des fascines alors une phase de négociation est engagée avec l'exploitant.

La question du dimensionnement de la fascine se pose uniquement lorsqu'elle a été acceptée. Le dimensionnement des fascines est également un paramètre difficile à intégrer dans l'arbre de décision du fait qu'il dépend fortement de deux variables : la taille du talweg et l'acceptation de l'agriculteur de l'emprise de la fascine sur son exploitation. Plus un talweg est marqué plus la fascine sera courte et inversement, moins le talweg est marqué plus la fascine sera longue. Un talweg marqué est la conséquence d'un ruissellement concentré, en revanche un talweg moins marqué est causé par un ruissellement diffus de ce fait la fascine devra être beaucoup plus grande pour pouvoir récupérer tout ce ruissellement. En prenant le paramètre « talweg » on obtient la taille « idéale » de la fascine qui est proposée à l'exploitant. Ensuite le dimensionnement est soit accepté soit diminué en fonction de la volonté de l'exploitant.

On pourrait imaginer deux arbres de décision pour l'implantation des fascines : un arbre de décision pour le positionnement et un arbre de décision pour le dimensionnement.



## Conclusion Générale et perspectives

L'implantation de fascines est un travail de longue haleine. Les communes volontaires, pour qui la mise en place des fascines est une action visible du fait de leur effet immédiat dès la première précipitation importante, ont permis de prouver l'efficacité des fascines aux plus sceptiques. La notoriété des fascines ayant augmenté au vu des résultats obtenus sur les communes équipées depuis les deux dernières années (2008 et 2009), plusieurs autres communes, touchées par les coulées d'eaux boueuses, ont souhaité la mise en place de ces ouvrages en complémentarité avec le travail d'assolement concerté réalisé par la Chambre d'Agriculture. Cependant, selon l'emplacement de la commune au sein du bassin versant, les longueurs de fascines à installer pour gérer les coulées d'eaux boueuses, peuvent augmenter rapidement. Chaque parcelle cultivée à équiper représente autant de négociations avec les exploitants.

Une efficacité optimale des fascines se trouve :

- dans leur répartition au sein du bassin versant. Celles qui sont implantées le plus en aval auront le plus d'impact à l'exutoire alors que celles en amont auront un effet plus local. Le réseau de fascine mis en place sur le bassin versant aura plus d'impact sur l'exutoire si l'on fait attention à la distance entre deux fascines. Si l'eau épurée à un trop long trajet à faire entre deux fascines, il est possible qu'elle se recharge en sédiment au cours du trajet, et l'effet des fascines à l'exutoire est moindre ;
- En associant la fascines à d'autres mesures (assolement concerté, couvert intercultures, rotation, TCS, etc...).

Au travers de cette étude nous avons pu réaliser un outil d'aide à la décision transposable pour divers bassins versants. Les facteurs qui sont pris en compte peuvent être déterminés facilement sur le terrain. L'arbre de décision réalisé avec des données fictives est l'arbre de décision que l'on souhaite obtenir par la suite. Des projets en cours vont permettre d'atteindre l'objectif de réaliser un tel arbre et d'alimenter nos connaissances sur l'implantation et le fonctionnement des fascines.

### **Les projets en cours :**

#### *Implantation des fascines*

D'autres bassins versants seront équipés de fascines dès le début de l'année 2010 et du fait de l'alternance des cultures chaque année, les bassins versants déjà équipés seront des campagnes de terrains seront faites également dans les bassins versants qui sont actuellement équipés de fascines.

Les fascines ayant été contournée cette année seront rallongées. De plus, l'événement du 11 mai 2009 a permis de mettre en évidence des nouveaux chemins d'eau ce qui nous a permis de connaître des emplacements intéressants pour des futures fascines afin de lutter au mieux contre les coulées d'eaux boueuses et d'avoir une efficacité optimale.

Parmi les exploitants ayant acceptés des fascines mortes cette année, certains sont volontaires pour les faire évoluer en fascines vivantes. Les boutures de saules seront implantées dès l'automne prochain. Nous pourrons ainsi évaluer au cours des années, l'évolution et l'efficacité des fascines vivantes et des fascines mortes.

#### *Gestion des fascines*

La question de gestion des fascines au cours du temps reste en suspend. Durant la période de juillet à novembre sera réalisée une campagne de terrain pour relever l'état des fascines implantées. Une réflexion sur la gestion des fascines sera engagée en négociation avec les exploitants. Actuellement, nous n'avons pas assez d'expérience pour voir l'évolution des fascines au cours des années. Cependant l'objectif est d'arriver à remettre des haies qui ont une efficacité à long terme. Néanmoins, cette solution n'est pas encore acceptée par tous.



### *Simulations*

Courant le mois de juillet 2009, des simulations sur la commune d'Alteckendorf seront faites. Cette commune à la particularité d'avoir au sein d'un même bassin versant des bandes enherbées, des fascines, une bonne alternance des cultures et un champ en TCS. Les simulations nous permettront de voir l'efficacité de la complémentarité de ces mesures. Ces nouvelles données pourront ainsi par la suite agrémenter l'outil d'aide à la décision réalisé.

### *Création de la base de données*

Une base de données à commencé à être établie à partir de données acquises sur le terrain. Certaines fascines ont été sollicitées lors de l'événement du 11 mai 2009, ce qui nous a permis de constater leur fonctionnement ou non.

D'autres régions de France (Picardie, Nord Pas de Calais, Haute Normandie) et de Belgique (Sint Truiden) ont déjà acquis de l'expérience, depuis plusieurs années, concernant la mise en place des fascines et autres mesures pour lutter contre les coulées d'eaux boueuses. Nous sommes allés à la rencontre de quatre personnes (Karel Vandaele, Bruno Ludwig, Vincent Prêtre et Bénédicte Lapiere) pour partager leurs expériences (cf. annexe n°5). Dans ces régions, la mise en place des fascines se fait également de façon empirique (Volonté des exploitants et des élus, témoignages, études de photos aériennes...). Les enjeux diffèrent selon les régions néanmoins le rôle de la fascine est le même : limiter la quantité de boues et écrêter la crue. La fascine est envisagée comme un élément complémentaire aux autres mesures de lutte contre les coulées d'eaux boueuses et sont destinées à devenir des haies à long terme.

De plus un stage devrait être réalisé courant de l'année universitaire 2009-2010 pour faire un inventaire des fascines implantées dans les régions du nord de la France. Une base de données précise pourra alors être établie à partir de cette grande campagne de terrain et pourra alimenter notre arbre de décision.

### *Création d'un cahier des charges*

Un cahier des charges concernant la mise en place des diguettes végétalisées, sur la base de l'expérience acquise cette année et lors de notre déplacement dans le Nord-Ouest, sera réalisé durant les quatre prochains mois (du mois d'août à novembre 2009).

### *Outil économique :*

Une étude sur les coûts économiques serait intéressante à réaliser pour permettre une prise de conscience des effets économiques engendrés par les mesures. Cette évaluation serait à faire pour chacune des communes touchées et permettrait la comparaison des coûts engendrés par les dégâts (habitations endommagées, nettoyage et réparation des infrastructures municipales, intervention des pompiers, dragage des rivières, etc.) avec le coût de l'investissement des mesures mise en place sachant que ces mesures réduisent le coût des dégâts par la suite. Cette étude sera réalisée courant l'année 2010.



## Bibliographie

### Revue scientifique, mémoires et thèses :

- **Auzet A-V et al.**, 2005, « *Les « coulées de boue » dans le Bas-Rhin : analyse à partir des dossiers de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.* », Dossier CATNAT « coulées de boue » 67, 28p.
- **Auzet A-V. et al.**, 1990, « *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grandes cultures : aspects aménagements.* », Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques, CEREG-URA 95 du CNRS. 39p.
- **Auzet A.-V.**, 1987, « *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques.* », Ministère de l'Environnement et de l'Agriculture, CEREG. 60 p.
- Maquette **Bordage D. et Nord Ouest création**, 2008, « *fascine : freiner les ruissellements, Provoquer la sédimentation.* » chambre d'agriculture de la Seine Maritime, AREAS. 4p.
- **Crémilleux B.**, 1991, « *Induction automatique : aspects théoriques, le système ARBRE, Applications en médecine.* » Université Joseph Fourier\_Grenoble1, Thèse de doctorat. 222p.
- **Dang T.H.**, 2007, « *Mesures de discrimination et leurs applications en apprentissage inductif.* », Université Pierre et Marie Curie, thèse de doctorat Paris 6. 172p.
- **Dunham M. H.**, 2003, « *Data Mining. Introductory and Advanced Topics.* » Prentice Hall, NJ. Pp. 92-102.
- **Fayyad et al.**, 1996, « *From data mining to knowledge discovery in databases.* » AI Magazine 17:37\_54.
- **Hawarah L.**, 2008, « *Une approche probabiliste pour le classement d'objets incomplètement connus dans un arbre de décision.* », Université Joseph fourier- Grenoble I. 166p.
- **Hofstetter E.**, 2008, « *Sensibilité d'un outil de modélisation du ruissellement et de l'érosion à la qualité des données sols.* », Université Strasbourg, rapport de fin d'étude. 106p.
- **Jacob A.**, 2008, « *Valorisation d'un modèle numérique de terrain haute résolution pour la modélisation des transferts dans un petit bassin versant.* » Université Strasbourg, rapport de stage de fin d'étude. 49p.
- **Kohavi R. and Quinlan R.**, 1999, « *Decision tree Discovery.* », Handbook of Data Mining and Knowledge Discovery, Klossgen & Zytkow Editors, Oxford University. Chapter 16 1.3, pp. 267-276.
- **Landeweerd G.H. et al.**, 1983, « *Binary tree versus single level tree classification of white blood cells.* » Pattern Recognition, 16(6): pp. 571–577,
- **Le Bissonnais Y.**, Thorette J., Bardet C., Daroussin J., 2002, « *L'érosion hydrique des sols en France.* », IFEN, Orléans. 106 p.
- **Lim et al.**, 2000, « *A comparison of prediction accuracy, complexity, and training time of thirty-three old and new classification algorithms.* » Machine Learning, 40(3) :203–228.
- **Maes A, Regenass P.**, 2007, « *Etude de la protection contre les crues et les coulées de boues provenant du bassin versant aux lieux dit « Grunen Brunnen et Baumgarten.* », Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, laboratoire de Géotechniques. 30p.
- **Mitchell T.**, 1997, « *Does machine learning really work* », AI magazine volume 18 number 3. 10p.



- **Parcevicus A.**, 2008, «*Lutte contre l'érosion des sols et contre les coulées d'eaux boueuses.*», Université de Strasbourg, mémoire master II. 42p.
- **Quinlan J.R.**, 1993, «*C4.5: Programs for machine learning.* », Edition n°5, publié par Morgan Kaufman, 2003, Literaturverz S. 291-296. 270p.  
<http://books.google.fr>, dernière connexion avril 2009.
- **Rakotomalala R.**, 2005, «*Arbres de décision*», Revue Remulad numéro 33. pp 165-187.
- **Rabaséda S.**, 1996, «*Contributions à l'extraction automatique de connaissances : application à l'analyse clinique de la marche.* » Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon I, France.
- **Rey F.**, 2007, «*Efficacité des ouvrages de génie biologique pour le piégeage des sédiments dans les ravines incisées dans les marnes (Alpes du Sud, France).* », Géomorphologie : relief, processus, environnement, n° 1/2005. URL : <http://geomorphologie.org/document222.html>. 16p.
- **Roman S.**, 1992, «*Coding and information theory.* » Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA. 486p.  
<http://books.google.fr>, dernière connexion avril 2009.
- **Safavian R.S & Landgrebe D.**, 1991, «*A survey of decision tree classifier methodology.* » IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 3(21) :660–674.
- **Shannon C.E.**, 1948, «*A mathematical theory of communication.* » The Bell System Technical Journal, Vol.27, pp. 379-423.
- **Tufféri S.**, 2006, «*Data Mining et statistique décisionnelle : l'intelligence des données.* », Edition Technip version revue et augmentée. 508p.  
<http://books.google.fr>, dernière connexion avril 2009
- **Utgoff P.E.**, 1989, «*Incremental Induction of Decision Trees.* » Machine Learning 4:161-186.
- **Van Dijk P.M., Sauter J., Koller R. & Auzet A-V.**, 2009, «*Cartographie de la sensibilité à l'érosion des sols et du risque potentiel de coulées d'eaux boueuses en Alsace* », dans : Actes des 10èmes JES (Journées d'Etude des Sols), 11 à 15 mai 2009, Strasbourg, 369-370.

#### Manuel :

- **Jetten V.**, 2002, «*LISEM: LIMbourg Soil Erosion Model, Windows version 2.x, user manuel* ». Université Utrecht, Utrecht Center for Environnement and Landscape Dynamics. 73p.
- **ARAA**, 2001, «*Guide des sols d'Alsace : Petite région naturelle n°5, Collines de Brumath, du Kochersberg et de l'arrière Kochersberg. Un guide pour l'identification des sols et leur valorisation agronomique.* », Région Alsace. 226p.

#### Sites internet :

- Site du Conseil Général du Bas-Rhin, dernière connexion mars 2009 :  
[www.cg67.fr](http://www.cg67.fr).
- Algorithme CART (Breiman et al 1984), dernière connexion avril 2009 :  
<http://www.grappa.univ-lille3.fr/~guilleron/PolyApp/node12/html>
- Site du Cemagref : SHYREG : la méthode SHYPRE régionalisée, dernière connexion juin 2009 :  
[www.cemagref.fr](http://www.cemagref.fr)



## Liste des figures (\*)

<i>Figure n°1</i> : Photos de coulées de boues 11 mai 2009	v6
<i>Figure n°2</i> : Photos de fascines avant et après un événement	v7
<i>Figure n°3</i> : Localisation du bassin de la Zorn et des communes étudiées	v8
<i>Figure n°4</i> : Bassin versant d'Ettendorf et localisation des fascines mises en place	v8
<i>Figure n°5</i> : distribution des pentes dans le bassin versant d'Ettendorf	v9
<i>Figure n°6</i> : Schéma de l'articulation des données et des modèles/logiciels	10
<i>Figure n°7</i> : Cartes d'entrée du LISEM dérivées du Modèle Numérique de Terrain	v13
<i>Figure n°8</i> : Exemples de cartes d'entrée du LISEM dérivée des données occupation du sol	v14
<i>Figure n°9</i> : Cartes relatives aux fascines simulées sur le bassin versant d'Ettendorf	v15
<i>Figure n°10</i> : photos fascines comblées par les sédiments à Ettendorf lors de l'événement du 11 mai 2009	v15
<i>Figure n°11</i> : photos illustrant efficacité des mesures de lutte contre les coulées d'eaux boueuses à Ettendorf lors de l'événement du 11 mai 2009	v16
<i>Figure n°12</i> : photos des dysfonctionnements des mesures de lutte contre les coulées d'eaux boueuses à Ettendorf lors de l'événement du 11 mai 2009	v16
<i>Figure n°13</i> : photos illustrant les limites des mesures mises en place	v16
<i>Figure n°14</i> : Carte du bassin versant avec les différents facteurs et l'indicateur	v17
<i>Figure n°15</i> : Calcul de la capacité de rétention des fascines et problème de surestimation des volumes	v18
<i>Figure n°16</i> : Sédigrammes et Hydrogrammes des fascines n°2, 6 et 7 pour les différentes pluies	v19
<i>Figure n°17</i> : Durée de remplissage des fascines pour une pluie d'une période de retour de 25 ans	21
<i>Figure n°18</i> : Durée de remplissage des fascines pour une pluie d'une période de retour de 50 ans	21
<i>Figure n°19</i> : Durée de remplissage des fascines pour une pluie d'une période de retour de 100 ans	21
<i>Figure n°20</i> : Efficacité des fascines à l'exutoire du bassin versant : Hydrogrammes et Sédigrammes de l'exutoire du bassin versant des différentes pluies (25, 50 et 100 ans)	v21
<i>Figure n°21</i> : Efficacité de rétention de sédiments des fascines et leur incidence sur les volumes d'eau écoulés à l'exutoire du bassin versant	22
<i>Figure n°22</i> : fascines en série et Indicateur	23
<i>Figure n°23</i> : Effet des fascines sur le temps d'arrivée du pic de crue	23
<i>Figure n°24</i> : Localisation des fascines pour le scénario « fascines bord de route »	v22
<i>Figure n°25</i> : Surface contributive en ha des fascines pour le scénario « fascines bord de route »	v22
<i>Figure n°26</i> : Exemple d'arbre de décision	30
<i>Figure n°27</i> : Conception d'un arbre de décision	30
<i>Figure n°28</i> : Information Mutuelle	33
<i>Figure n°29</i> : Arbre de décision	36

## Liste des tableaux

<i>Tableau n°1</i> : Caractéristiques des pluies sur 30 minutes suivant la période de retour	13
<i>Tableau n°2</i> : Cartes dérivées du MNT	14
<i>Tableau n°3</i> : Cartes traduisant la végétation	14
<i>Tableau n°4</i> : Cartes d'infiltration (modèle de Green & Ampt, 1911)	14
<i>Tableau n°5</i> : Cartes relatives à l'érosion et au dépôt	15
<i>Tableau n°6</i> : Cartes des états de surface	15
<i>Tableau n°7</i> : Cartes des chemins et des routes	15
<i>Tableau n°8</i> : Efficacité de rétention des sédiments et d'eau des fascines	20
<i>Tableau n°9</i> : Tableau récapitulatif du temps de remplissage des fascines	22
<i>Tableau n°10</i> : Extrait des données obtenues par les simulations du scénario pour les différentes pluies	24
<i>Tableau n°11</i> : Base de données : mise en place fascines	35
<i>Tableau n°11.1</i> : sous-ensemble associé à la valeur Faible d'Indicateur	35
<i>Tableau n°11.2</i> : sous-ensemble associé à la valeur Moyen d'Indicateur	35
<i>Tableau n°11.3</i> : sous-ensemble associé à la valeur Fort d'Indicateur	36

\* : les figures ayant comme pagination « v » se trouvent au verso des pages.



## **Annexes**

Annexe n°1 : Organigramme du Pôle Développement des Territoires du Conseil Général du Bas-Rhin.

Annexe n°2 : Schéma de fonctionnement du LISEM.

Annexe n°3 : Données pluviométriques pour le modèle LISEM : Hyetogrammes d'après la méthode SHYPRE

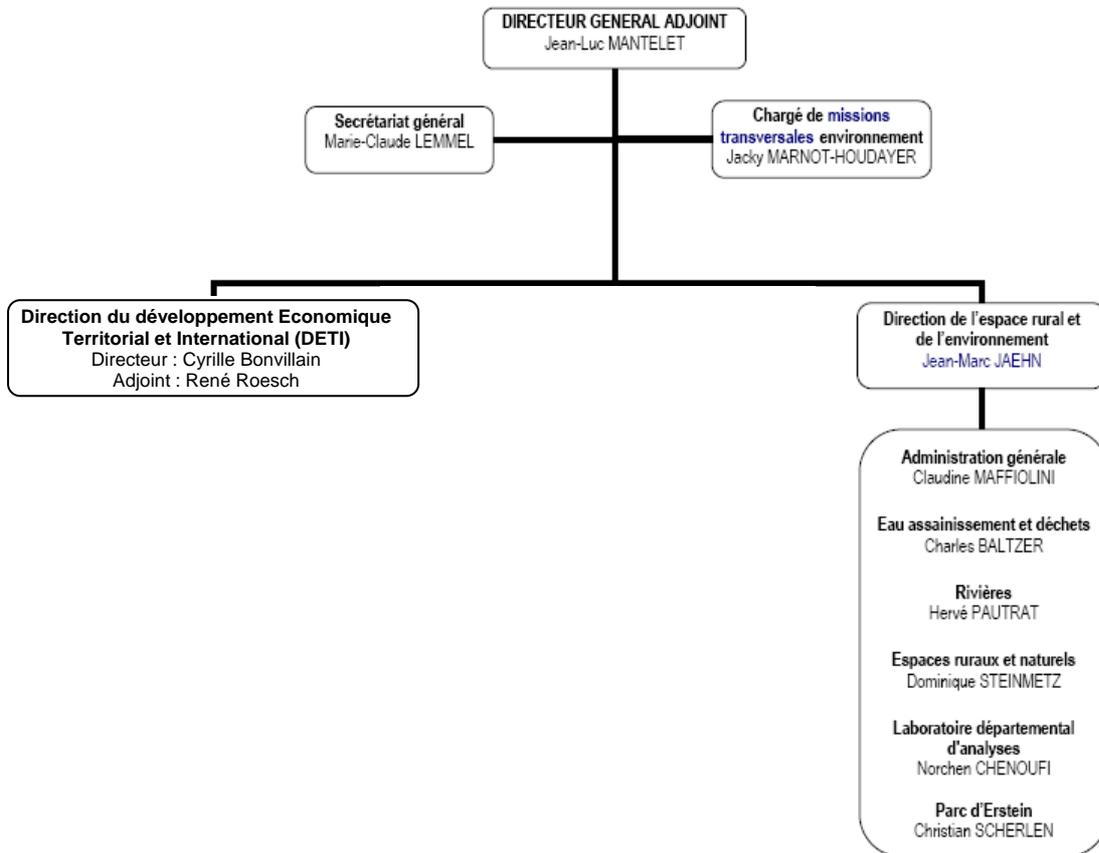
Annexe n°4 : Mode de calcul de rétention des fascines

Annexe n°5 : Visite des sites dans le Nord-Ouest

Annexe n°6 : Carte de la sensibilité à l'érosion. Kochersberg et vallée de la Zorn



## POLE DEVELOPPEMENT DU TERRITOIRE



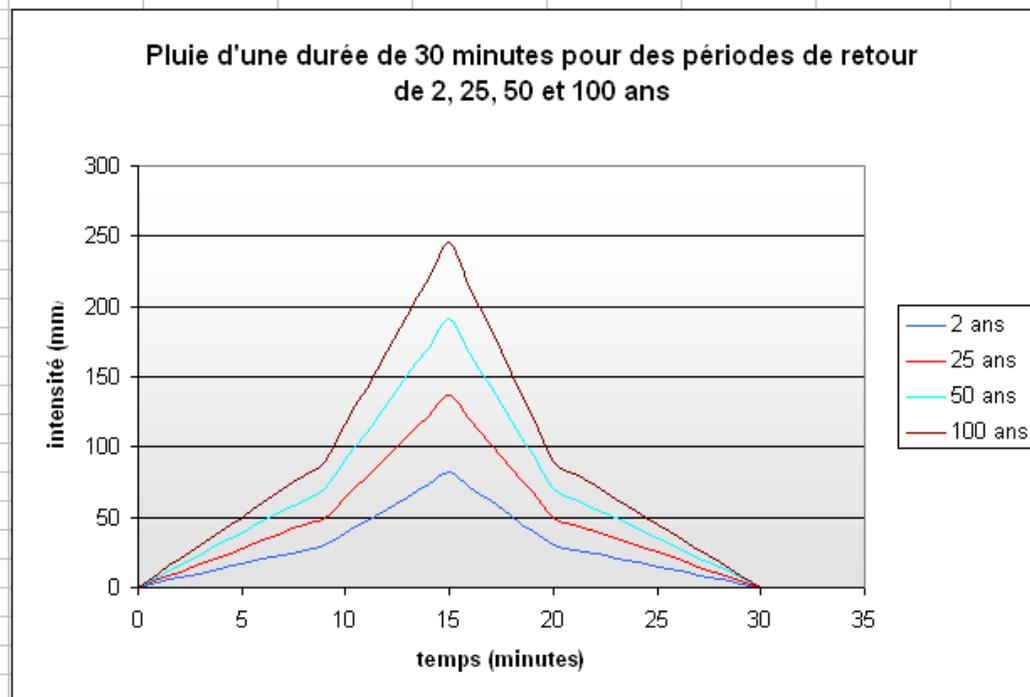






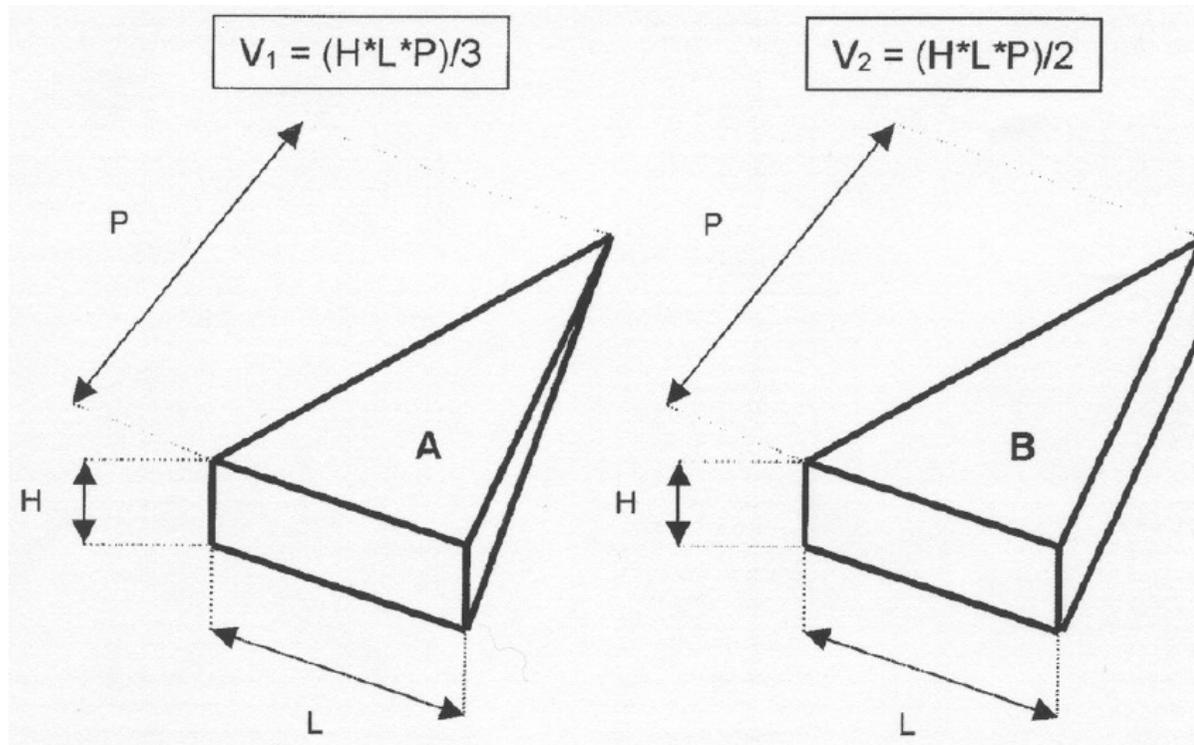
Annexes n°3 : Données pluviométriques pour le modèle LISEM : Hyetogrammes d'après la méthode SHYPRE

période de retour temps (minutes)	intensité de pluie (mm/h)			
	2 ans	25 ans	50 ans	100 ans
0	0	0	0	0
1	3,3	5,6	7,8	10,0
2	6,7	11,1	15,6	20,0
3	10,0	16,7	23,3	30,0
4	13,3	22,2	31,1	40,0
5	16,7	27,8	38,9	50,0
6	20,0	33,3	46,7	60,0
7	23,3	38,9	54,4	70,0
8	26,7	44,4	62,2	80,0
9	30,0	50,0	70,0	90,0
10	38,7	64,4	90,2	116,0
11	47,3	78,9	110,4	142,0
12	56,0	93,3	130,6	167,9
13	64,6	107,7	150,8	193,9
14	73,3	122,2	171,0	219,9
15	82,0	136,6	191,2	245,9
16	71,6	119,3	167,0	214,7
17	61,2	102,0	142,7	183,5
18	50,8	84,6	118,5	152,4
19	40,4	67,3	94,2	121,2
20	30,0	50,0	70,0	90,0
21	27,0	45,0	63,0	81,0
22	24,0	40,0	56,0	72,0
23	21,0	35,0	49,0	63,0
24	18,0	30,0	42,0	54,0
25	15,0	25,0	35,0	45,0
26	12,0	20,0	28,0	36,0
27	9,0	15,0	21,0	27,0
28	6,0	10,0	14,0	18,0
29	3,0	5,0	7,0	9,0
30	0,0	0,0	0,0	0,0





Annexe n°4 :  
Calculs de la capacité de rétention de terre des fascines



Méthode de calcul de sédiments piégés par les micro-ouvrages tels que les fascines.

A : Volume de sédiments piégés en forme de pyramide  
B : Volume de sédiments piégés en forme de prisme  
H = Hauteur de boue accumulée au niveau de la fascines ;  
L = Largeur de l'atterrissement ;  
P = Longueur de l'atterrissement vers l'amont de la ravine

Source : Rey F., 2007



### PARTICIPANTS AU VOYAGE :

**Michel Batt**, Conseiller Agricole de la Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin

**Anne-Véronique Auzet**, Professeur à la Faculté de Géographie de Strasbourg

**Florence Le Ber**, Professeur-Ingénieur à l'École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg

**Yann Vincent**, Technicien Rivières du Conseil Général du Bas-Rhin, Antenne Haguenau

**Franck Hufschmitt**, Ingénieur Rivières du Conseil Général du Bas-Rhin, Antenne Saverne

**Paul Van Dijk**, Dr à l'Association de la Relance Agronomique d'Alsace

### PERSONNES RENCONTREES :

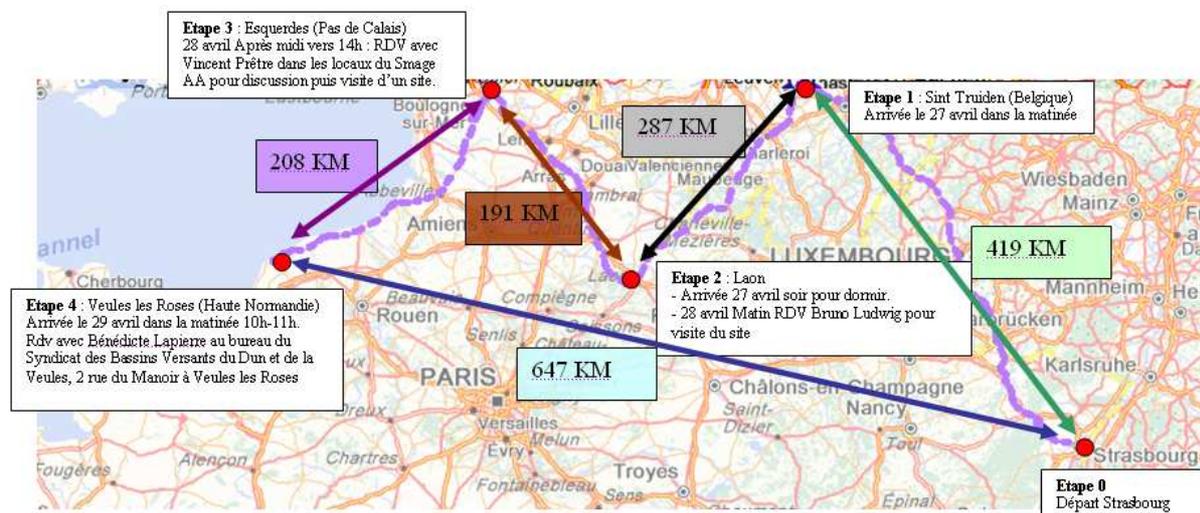
**Vincent Prêtre**, animateur agricole au Syndicat Mixte pour l'Aménagement et la Gestion des Eaux de l'Aa à Esquerdes (62).

**Bénédictte Lapiere**, animatrice au Syndicat Mixte des bassins versants du Dun et de la Veules à Veules les Roses (76).

**Bruno Ludwig**, ingénieur au SORANGE à LAON (02).

**Karel Vandaele**, ingénieur au Watering van Sint-Truiden à Sint Truiden (Belgique).

### PARCOURS DU VOYAGE :



### Objectif de ce voyage :

Les fascines sont un des moyens de lutte contre les coulées d'eaux boueuses utilisées dans de plusieurs régions de France et en Belgique. Ce voyage à permis de rencontrer les personnes responsables de la problématique des coulées d'eaux boueuses afin de recueillir leurs expériences, de voir quelles étaient les règles de décisions pour la mise en place des fascines.

### Compte rendu du voyage :

Ces régions ont acquis de l'expérience depuis plusieurs années et sont à une autre étape contre la lutte contre les coulées d'eaux boueuses. Même si les enjeux et les contextes climatiques, géomorphologiques et topographiques différent la mise place des fascines est la même : elle se fait de façon empirique. En d'autre terme, la disposition et le dimensionnement des fascines se fait selon la volonté des exploitants et à travers leurs témoignages et des photos aériennes. La fascine est une étape pour rétablir des haies dans les champs. Actuellement, dans ces régions les fascines mises en place sont uniquement des fascines vivantes. Elles sont envisagées comme un élément complémentaire et non pas une solution. C'est en l'associant à d'autres mesures (assolement



concerté, couvert intercultures, rotation, TCS, etc...) que la fascine pourra jouer son rôle de façon optimal. La fascine est un moyen sur le court terme. Les fascines mortes qui ont été posées n'excèdent pas les 40m contrairement à ce qu'on a pu poser dans le Bas-Rhin, la plus longue est de 180m. Au delà on mettrait en place des fascines vivantes destinées à devenir des haies. Tous s'accordent à dire qu'une efficacité optimale des fascines se trouve dans leur répartition au sein du bassin versant. Celles qui sont implantées le plus en aval auront le plus d'impact à l'exutoire alors que celles en amont auront un effet plus local. Le réseau de fascine mis en place sur le bassin versant aura plus d'impact sur l'exutoire si l'on fait attention à la distance entre deux fascines. Si l'eau épurée à un trop long trajet à faire entre deux fascines, il est possible qu'elle se recharge en sédiment au cours du trajet. La reprise de sédiment dépend de plusieurs facteurs : la forme du bassin versant, les cultures mises en place et leur alternance, pente etc....

Aucune de ces régions n'a réalisée un suivi de l'évolution des fascines au cours des années. Aucune base de données n'a été faite pour répertorier les ouvrages mis en place au sein des bassins versants. De ce fait il leur est difficile de nous apporter des réponses précises sur l'évolution des fascines après plusieurs événements pluvieux.



Annexe n°6 : Carte de sensibilité à l'érosion. Kochersberg et Vallée de la Zorn.

Source : Paul Van Dijk, ARAA

Sensibilité à l'érosion  
(maille 20 m)

Kochersberg et vallée de la Zorn



Légende

-  point d'entrée potentiel dans zone urbaine
-  cours d'eau
-  zone urbaine / routes
-  bassin versant

Sensibilité à l'érosion

-  très faible
-  faible
-  moyenne
-  forte
-  très forte

Méthode utilisée : INRA-BRGM (2006)  
Conception et traitement des données :  
ARAA, Paul van Dijk (2007)  
Fonds cartographiques :  
BD-OCS 2000-CJGAL (R)  
BD CARTHAGE V3.0 (2002) (R)

0 2 4 8 Kilomètres







## Optimisation des micro-ouvrages de lutte contre les coulées d'eaux boueuses par la modélisation

### Résumé

Les phénomènes de coulées d'eaux boueuses se sont accrus en Europe. L'Alsace est une région de France régulièrement touchée par ces phénomènes. Une étude expérimentale a été menée l'année dernière dans le Bas-Rhin afin d'évaluer le fonctionnement des fascines, une des mesures existantes pour lutter contre les coulées d'eaux boueuses. La mise en place de ces micro-ouvrages est régie par l'expérience (témoignages et photos des événements passés) et par une volonté émanant des élus et des exploitants, soucieux de remédier à cette problématique. Selon l'objectif que l'on recherche certaines fascines seront plus efficaces lorsqu'elles sont positionnées en tête du bassin versant, alors que d'autres seront plus efficaces réparties au sein du bassin versant. La mise en place des fascines est précisément l'objet du développement de ce stage : comment peut-on optimiser leur mise en place pour avoir un impact optimal pour limiter les dégâts engendrés par les coulées d'eaux boueuses ? Quels sont les facteurs indispensables à prendre en compte lors de leur positionnement ?

L'objectif de ce stage est de réaliser un outil d'aide à la décision pour la mise en place des fascines. L'optimisation des fascines va être étudiée sous l'angle de la modélisation. Deux types de modélisation complémentaires ont été envisagés : une modélisation à base physique (LISEM : Limbourg Soil Erosion model) et une modélisation pour l'aide à la décision (arbre de décision).

*Mots-clés : Coulées d'eaux boueuses, optimisation des fascines, modélisation LISEM, arbre de décision, outil d'aide à la décision.*

---

### Abstract

The muddy floods phenomena increased recently across Europe. Alsace is French region where these phenomena occur regularly. Last year, an experimental study was led in the Bas-Rhin in order to assess the functioning of fascines,

One of the existing measures aiming to decrease the impact of those muddy floods. The installation of these micro-structures is dictated by the experience (testimonies and photographs of past events) and by the will of concerned local stakeholders (elected representatives and farmers), preoccupied to find a remedy to this problem.

Depending on their purpose, some fascines will be more efficient if positioned at the head of the catchment area, while others will be more efficient if spread across the catchment area. The implementation of fascines was the subject of this internship: how one can optimize fascines installation in order to limit the impact of muddy floods. What are the factors that have to be considered during the installation of the fascines? The objective of this internship was to create a decision making tool that could be used during the installation of those structures. The fascines optimization was studied through the modeling angle. Two complementary types of models were taken into account: a model (LISEM:Limbourg Soil Erosion Model) and a help in decision-making model (decision tree)

*Keywords: Muddy floods, optimisation of « fascine », LISEM modelisation, decision trees, decision maker.*