



Optimisation de l'efficacité des ouvrages d'hydraulique douce pour réduire les coulées d'eau boueuse en Alsace : une étude de modélisation par le modèle openLISEM

HÉLÈNE LEDUC

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN
SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT À FINALITÉ**

ANNÉE ACADÉMIQUE : 2016-2017

PROMOTEUR : AURORE DEGRÉ

COPROMOTEUR : PAUL VAN DIJK (ARAA)

MEMBRES DU JURY : CATHERINE CHARLES (PRÉSIDENTE), GILLES COLINET ET MARC DUFRENE

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT.



Optimisation de l'efficacité des ouvrages d'hydraulique douce pour réduire les coulées d'eau boueuse en Alsace : une étude de modélisation par le modèle openLISEM

HÉLÈNE LEDUC

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN
SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT À FINALITÉ**

ANNÉE ACADÉMIQUE : 2016-2017

PROMOTEUR : AURORE DEGRÉ

COPROMOTEUR : PAUL VAN DIJK (ARAA)

MEMBRES DU JURY : CATHERINE CHARLES (PRÉSIDENTE), GILLES COLINET ET MARC DUFRENE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont entourée et accompagnée pendant ces 6 derniers mois.

Tout d'abord, merci à Rémi Koller, directeur de l'ARAA, de m'avoir permis de réaliser mon travail de fin d'études au sein de l'association.

Merci à toute l'équipe de l'ARAA : Anne-Marie Barthelmé, Hélène Baudet, Lucie Martin, Olivier Rapp, Joëlle Sauter, Anne Schaub et particulièrement à Paul van Dijk qui m'a accompagnée et guidée tout au long de ce travail. Merci pour tous les échanges positifs et constructifs et pour tes commentaires avisés sur ce rapport.

Je tiens également à remercier Victor Jetten, concepteur du logiciel openLISEM, pour toutes ses explications et pour les mises à jour du logiciel.

Lors de ce travail, j'ai reçu l'aide de plusieurs personnes. Je remercie Rémi Michael, Claire Cugnière et François Alves de la Chambre d'agriculture d'Alsace, Karel Vandaele (Watering van Sint-Truiden), ainsi que Jean-François Ouvry et Jean-Baptiste Richet de l'AREAS.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis qui m'ont soutenue pendant ces cinq années d'études.

RESUME

L'érosion hydrique cause chaque année de nombreux dégâts dans les villages et dans les parcelles agricoles. Les conséquences de ce phénomène sont des coulées d'eau boueuse. En Alsace, ce phénomène tend à s'intensifier notamment dans la région du Kochersberg et du Sundgau. Cette intensification est liée à de fortes pluies orageuses, des cultures de printemps, des sols limoneux sensibles et un relief prononcé. Afin de lutter contre ces événements, des ouvrages d'hydraulique douce (fascine, bandes enherbées, bandes de miscanthus, haies) peuvent être mis en place sur un bassin versant. Cependant, les ouvrages sont jusqu'à présent placés et dimensionnés sans nécessairement tenir compte de critères-clés qui amélioreraient l'efficacité de ces actions de lutte contre les coulées d'eau boueuse, à savoir leur position et leur nombre dans le bassin versant ainsi que l'accord entre le type d'ouvrage et la nature des flux entrants. Ce travail a pour objectif de guider le choix du type de dispositif à installer, ses dimensions et sa localisation en fonction du type de flux entrant (diffus ou concentré), des réductions des pertes en terre et des débits de pointe à l'exutoire obtenus. Ce travail a été réalisé par des simulations à l'aide du logiciel openLISEM sur deux bassins versants, un à Eckwersheim (67) et un à Ruederbach (68). Les résultats des modélisations ont mis en évidence que certains ouvrages ont une efficacité plus grande pour réduire les pertes en terre, comme les haies, les fascines et les bandes de miscanthus pour des flux diffus plus en amont du bassin versant. Pour les flux concentrés plus en aval, ce sont les haies et les fascines qui sont efficaces. Pour réduire le débit de pointe, en flux diffus, les fascines, les bandes de miscanthus et les haies sont des ouvrages adaptés, alors que pour les flux concentrés, seuls les fascines et les bandes de miscanthus conviennent. De plus, ces ouvrages doivent au moins faire 10 mètres de large pour les bandes de miscanthus et les haies doivent être composées de 6 rangs. Cette étude met également en évidence le rôle des assolements concertés, des techniques culturales sans labour et de la gestion de zones enherbées et des fossés. Ces mesures doivent venir en complément à l'hydraulique douce pour réduire efficacement les coulées d'eau boueuse.

Mots clés : érosion hydrique, coulée d'eau boueuse, Alsace, hydraulique douce, modélisation, openLISEM

ABSTRACT

Water erosion causes a lot of damage every year in villages and in agricultural plots. The consequences of this phenomenon are muddy flows. In the Alsace, this phenomenon tends to increase, in particular in the Kochersberg and Sundgau regions. This intensification is linked to heavy storms, spring crops, sensitive loamy soils, and a pronounced relief. In order to combat these events, vegetative barriers (fascine, grass strips, miscanthus strips and hedges) can be installed in the catchment. So far, size and position of these barriers in the landscape are often decided on the basis of practical considerations; a decisional framework helping to maximise the reduction of fluxes the catchment outlet by considering the optimal type, location, spatial density and dimensions of such barriers in the catchment is still missing. The goal of this work is to provide guides for the choice of the position and number of barriers in the catchment and to adapt the barrier type to the type of the incoming flow (non-concentrated or concentrated). In order to optimise the reduction of water and sediment output at the outlet of catchments. This work is carried out by simulations using the openLISEM software on two watersheds, one in Eckwersheim (67) and one in Ruederbach (68). Modelling results show that some structures have greater efficiency in reducing soil losses, such as hedges, fascines and miscanthus strips for non-concentrated flow. For concentrated flows, hedges and fascines are effective. In order to reduce peak discharge, the miscanthus strips and hedges are suitable structures for non-concentrated flow, while for concentrated flows only fascine and miscanthus strips are suitable. In addition, these structures must be at least 10 meters wide for the miscanthus strips, and hedges must be composed of 6 rows. This study also highlights the role of joint cropping plans, reduced tillage and the management of grassed areas and ditches. These measures must be completed by the implementation of vegetative engineering works to reduce the problem of muddy flows.

Key words: water erosion, muddy flows, Alsace, vegetative barriers, modelling study, openLISEM

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	1
2. STRUCTURE D’ACCUEIL ET MISSION DE STAGE.....	2
2.1. DESCRIPTION BREVE DE L’ARAA.....	2
2.2. LA PLACE DU STAGE EFFECTUE	2
3. PROBLEMATIQUE D’EROSION ET DE COULEES D’EAU BOUEUSE EN ALSACE.....	4
3.1. DEFINITIONS ET FACTEURS	4
3.2. AMPLEUR ET EVOLUTION DU PHENOMENE DES COULEES D’EAU BOUEUSE EN ALSACE.....	5
3.3. CONTEXTE DE L’ALSACE	8
3.3.1. <i>Climat</i>	8
3.3.2. <i>Géologie et pédologie</i>	8
3.3.3. <i>Occupation du sol</i>	11
3.4. MOYENS DE LUTTE CONTRE L’EROSION.....	11
3.5. OBJECTIFS DU TRAVAIL.....	12
4. ETAT DE L’ART SUR LE ROLE DE L’HYDRAULIQUE DOUCE DANS LES PROBLEMATIQUES DE RUISSELLEMENT ET D’EROSION	15
4.1. CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES D’HYDRAULIQUE DOUCE	15
4.1.1. <i>Les fascines</i>	15
4.1.2. <i>Les haies</i>	17
4.1.3. <i>Les bandes de miscanthus</i>	18
4.1.4. <i>Les bandes enherbées</i>	19
4.2. AUTRES OUVRAGES AGISSANT SUR LES TRANSFERTS DES FLUX.....	21
4.2.1. <i>Les bassins de rétention</i>	21
4.2.2. <i>Les fossés</i>	21
4.3. RESULTATS DU STAGE PRECEDENT DE BENOIT FRICONNET	22
4.4. STRATEGIES DE LOCALISATION DES OUVRAGES	22
4.4.1. <i>Localisation des ouvrages</i>	22
4.4.2. <i>Densité d’ouvrages sur un bassin versant</i>	23
4.4.3. <i>Aménagement de bassin versant</i>	24
5. METHODOLOGIE	25
5.1. DEFINITIONS DES PARAMETRES HYDRAULIQUES ET HYDROLOGIQUES DES DISPOSITIFS.....	27
5.2. HYPOTHESES SUR LES SCENARIOS DE LOCALISATION DES DISPOSITIFS.....	27
5.3. MODELISATION DE L’EROSION PAR LE MODELE OPENLISEM.....	29
5.3.1. <i>Généralités</i>	29
5.3.2. <i>Données d’entrée</i>	30
5.3.2.1. MNT	30
5.3.2.2. Carte des sols	30
5.3.2.3. Carte de l’occupation du sol	31
5.3.2.4. Précipitations	31
5.3.3. <i>Cartes dérivées</i>	31
5.3.3.1. Cartes dérivées du MNT	31
5.3.3.2. Cartes dérivées de la carte d’occupation du sol	32
5.3.3.3. Cartes dérivées de la carte des sols.....	32
5.3.4. <i>Equations de modélisation d’écoulement en surface</i>	33
5.3.4.1. Ecoulement de surface en 1D : l’onde cinématique	33
5.3.4.2. Ecoulement en 2D : l’onde diffuse.....	34
5.3.5. <i>Script, options et paramétrages</i>	34
5.3.5.1. Paramètres d’occupation du sol	34

5.3.5.2.	Paramètres du sol.....	35
5.3.5.3.	Paramètre d'érosion.....	36
5.3.6.	<i>Représentation des ouvrages dans le modèle</i>	36
5.3.7.	<i>Les sorties du modèle</i>	37
5.4.	CRITERES D'EVALUATION D'EFFICACITE DES SCENARIOS.....	37
5.5.	ARBRE DE DECISION.....	37
5.6.	SCENARIOS OPTIMISES.....	38
6.	ZONES D'ETUDES	39
6.1.	ECKWERSHEIM.....	39
6.2.	RUEDERBACH.....	41
7.	RESULTATS ET INTERPRETATIONS	44
7.1.	SIMULATIONS PREALABLES.....	44
7.1.1.	<i>Effet du splash delivery ratio (SDR)</i>	44
7.1.2.	<i>Effet du facteur de calibration de ψ</i>	44
7.1.3.	<i>Effet du modèle d'écoulement hydraulique</i>	45
7.2.	SIMULATIONS DES OUVRAGES D'HYDRAULIQUE DOUCE.....	47
7.2.1.	<i>Généralités globales</i>	49
7.2.2.	<i>Dimension des ouvrages</i>	50
7.2.3.	<i>Type d'écoulement entrant</i>	51
7.2.4.	<i>Différences entre bassins versants</i>	53
7.3.	SIMULATIONS COMPLEMENTAIRES.....	53
7.3.1.	<i>Actions agricoles</i>	53
7.3.2.	<i>Aménagements</i>	55
7.3.2.1.	<i>Aménagement des fossés</i>	55
7.3.2.2.	<i>Aménagement des berges</i>	56
7.3.2.3.	<i>Rôle des bassins de rétention</i>	56
7.4.	PROGRAMME D'ACTION COMBINEES.....	56
7.4.1.	<i>Arbre de décision</i>	56
7.4.2.	<i>Actions combinées</i>	60
8.	LIMITES DE L'ETUDE	63
9.	CONCLUSION	64
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
	ANNEXES	

TABLE DES ABRÉVIATIONS

ARAA : Association pour la relance agronomique en Alsace

AREAS : Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols

BCAE : Bonnes conditions agricoles et environnementales

BV : Bassin versant

CatNat : Catastrophe naturelle

CEB : Coulées d'eau boueuse

FEADER : Fonds européens agricoles pour le développement rural

GERIHCO : Gestion des risques et histoire des coulées d'eau boueuse

HD : Hydraulique douce

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière (France)

INRA : Institut national de la recherche agronomique

LDD : Local drainage direction

LIDAR : Light Detection and Ranging

ml : mètre linéaire

MNT : Modèle numérique de terrain

RPG : Registre parcellaire graphique

SAU : Surface agricole utile

SDR : *Splash delivery ratio*

TCSL : Techniques culturales sans labour

UCS : Unité cartographique des sols

TABLES DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1. EXEMPLES D'ÉROSION AU SEIN DE PARCELLES AGRICOLES (POMME DE TERRE, MAÏS, OIGNONS) A ECKWERSHEIM, LE 15/05/2017 (© H. LEDUC)	5
FIGURE 2. SENSIBILITE A L'ÉROSION EN 5 CLASSES SELON LA METHODE MESALES (VAN DIJK <i>ET AL.</i> , 2009)	6
FIGURE 3. EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE ET DE LA TEMPERATURE EN ALSACE SUR LES 40 DERNIERES ANNEES (VAN DIJK <i>ET AL.</i> , 2016)	7
FIGURE 4. DISTRIBUTION TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS SUR UNE ANNEE EN ALSACE (VAN DIJK <i>ET AL.</i> , 2016).....	7
FIGURE 5. EVOLUTION DE LA PART DES TERRES LABOURABLES, DU MAÏS GRAIN, DES SURFACES EN HERBE ET DES CEREALES A PAILLE DANS LA SAU (VAN DIJK <i>ET AL.</i> , 2016)	8
FIGURE 6. PETITES REGIONS NATURELLES D'ALSACE (PARTY <i>ET AL.</i> , 1999)	9
FIGURE 7. CARTE DES GRANDS DOMAINES MORPHOLOGIQUES D'ALSACE (ARAA, 2012).....	10
FIGURE 8. EXEMPLE D'ASSOLEMENT CONCERTE	12
FIGURE 9. ORGANIGRAMME DES OBJECTIFS DU TRAVAIL	13
FIGURE 10. FASCINE MORTE (© PAUL VAN DIJK)	15
FIGURE 11. HAIE ARBUSTIVE (©PAUL VAN DIJK)	17
FIGURE 12. VEGETATION AU PIED D'UNE JEUNE HAIE ARBUSTIVE A ALTECKENDORF, LE 13/03/2017 (©PAUL VAN DIJK)	17
FIGURE 13. BANDE DE MISCANTHUS (© PAUL VAN DIJK).....	18
FIGURE 14. MULCH PRESENT AU PIED DU MISCANTHUS (© PAUL VAN DIJK).....	19
FIGURE 15. BANDE ENHERBEE EN AVAL D'UNE PARCELLE AGRICOLE (©PAUL VAN DIJK)	20
FIGURE 16. FOSSE ENHERBE (A GAUCHE) ET UN FOSSE A REDENT (A DROITE) (SOURCE : IRSTEA)	21
FIGURE 17. ÉTAPES PRINCIPALES DE LA METHODOLOGIE	26
FIGURE 18. CALCUL DE LONGUEUR DE LA FASCINE (J.B. STAQUET)	28
FIGURE 19. ORGANIGRAMME DU MODELE OPENLISEM. EN ROUGE, LES PROCESSUS LIES AUX SEDIMENTS. EN BLEU, CEUX LIES A L'HYDROLOGIE. LES DONNEES NECESSAIRES POUR CHAQUE PROCESSUS SONT REPRISES EN GRIS (JETTEN <i>ET AL.</i> , 2017)	30
FIGURE 20. CARTE DES DIRECTIONS DES FLUX (LDD.MAP), A GAUCHE ET CARTE D'ACCUMULATION DES FLUX, ACCU.MAP (A DROITE) .	31
FIGURE 21. MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (GAUCHE) ET LDD ASSOCIE (DROITE)	33
FIGURE 22. MESURE DE LA FRACTION DU SOL COUVERTE PAR LES RESIDUS ET LA VEGETATION (© H.LEDUC).....	35
FIGURE 23. LOCALISATION DE LA COMMUNE D'ÉCKWERSHEIM.....	39
FIGURE 24. POSITIONNEMENT DES MESURES DE LUTTE CONTRE L'ÉROSION SUR LE BASSIN VERSANT D'ÉCKWERSHEIM	40
FIGURE 25. COULEE D'EAU BOUEUSE DANS LA RUE A ECKWERSHEIM LE 12/05/17 (© NICOLAS RIEFFEL).....	40
FIGURE 26. REMPLISSAGE DES ZONES DE RETENTION EN AMONT DES CHEMINS SURELEVES.....	41
FIGURE 27. LOCALISATION DE LA COMMUNE DE RUEDERBACH	41
FIGURE 28. ETAT DES FOSSES A RUEDERBACH (© HELENE LEDUC).....	42
FIGURE 29. INFLUENCE DE ψ SUR LA COURBE DE L'HYDROGRAPHE	45
FIGURE 30. CARTE D'INFILTRATION (MM/H) DE LA REFERENCE : A. MODELE 1D ET B. MODELE 2D	46
FIGURE 31. CARTE DES PERTES EN TERRE (T/HA) DE LA REFERENCE : A. MODELE 1D ET B. MODELE 2D. LES VALEURS POSITIVES REPRESENTENT LES ZONES DE DETACHEMENT DES PARTICULES DE TERRE ET LES VALEURS NEGATIVES, LES ZONES DE DEPOTS. ...	46
FIGURE 32. LOCALISATION DES OUVRAGES A ECKWERSHEIM : A. ECOULEMENT DIFFUS : LES FASCINES SONT EN ROUGE, LES BANDES ENHERBEES EN JAUNE ; B. ECOULEMENT CONCENTRE : LES FASCINES SONT EN ROSE	47
FIGURE 33. LOCALISATION DES OUVRAGES A RUEDERBACH : A. ECOULEMENT DIFFUS ET B. ECOULEMENT CONCENTRE. LES FASCINES SONT EN ROUGE, LES BANDES ENHERBEES ASSOCIEES EN JAUNE ET LES FOSSES EN NOIR	48
FIGURE 34. A. CROUTE DE BATTANCE DANS UN CHAMP DE MAÏS LABOURE ET B. ABSENCE DE CROUTE DE BATTANCE DANS LE CHAMP AVEC DES TECHNIQUES SANS LABOUR (PHOTOS PRISES LE 2/6/17 A MUNDOLSHEIM, ALSACE) (© HELENE LEDUC)	55
FIGURE 35. ARBRE DE DECISION.....	58
FIGURE 36. RADAR DES CRITERES HYDRAULIQUES POUR CHAQUE OUVRAGE TESTE. LES NOTES VONT DE 1 (TRES FAIBLE) A 5 (TRES IMPORTANT).....	59
FIGURE 37. RADAR DES CRITERES SUPPLEMENTAIRES A PRENDRE EN COMPTE DANS L'IMPLEMENTATION D'UN OUVRAGE. LES NOTES VONT DE 1 (TRES FAIBLE) A 5 (TRES IMPORTANT).	59
FIGURE 38. SCHEMA D'AMENAGEMENT DU BASSIN VERSANT D'ÉCKWERSHEIM. EN ROUGE, LES FASCINES, EN JAUNE LES HAIES ET EN ROSE, LE CHENAL ENHERBE	60

FIGURE 39. PROPOSITION D'AMENAGEMENT SUR LE BASSIN VERSANT DE RUEDERBACH. EN ROUGE, LES FASCINE, EN JAUNE, LES HAIES ET LES BANDES DE MISCANTHUS EN ROSE	61
TABLEAU 1. SYNTHESE DES CAPACITES DES OUVRAGES D'HYDRAULIQUE DOUCE (FRICONNET, 2016)	22
TABLEAU 2. DENSITE DE FASCINES ET APPRECIATION DE L'INTENSITE D'AMENAGEMENT DU BASSIN VERSANT (C. CUGNIERE ET R. MICHAEL, COMMUNICATION PERSONNELLE 2017)	23
TABLEAU 3. DENSITE DE BANDES ENHERBEES ET APPRECIATION DE L'INTENSITE D'AMENAGEMENT DU BASSIN VERSANT	24
TABLEAU 4. SYNTHESE DES PARAMETRES UTILISES POUR LES OUVRAGES D'HYDRAULIQUE DOUCE	27
TABLEAU 5. SYNTHESE DES SCENARIOS A SIMULER	28
TABLEAU 6. INFLUENCE DU SPLASH DELIVERY RATIO	44
TABLEAU 7. RECAPITULATIF DES RESULTATS DES DEUX MODELES.....	46
TABLEAU 8. SYNTHESE DES EFFICACITES DES OUVRAGES SUR LE DEBIT DE POINTE, LE VOLUME D'EAU ET LES PERTES EN TERRE SELON LE TYPE DE FLUX ENTRANT, LE BASSIN VERSANT ETUDIE ET LA DIMENSION DE L'OUVRAGE	49
TABLEAU 9. SYNTHESE DE L'EFFICACITE DES OUVRAGES EN FONCTION DE LEUR DIMENSION ET DES FLUX D'EAU ENTRANTS, SUR LES DEBITS DE POINTE ET LES PERTES EN TERRE : MOYENNES (\pm ECART TYPES).....	51
TABLEAU 10. SYNTHESE DE L'EFFICACITE DES OUVRAGES SUR LE FLUX ENTRANT : MOYENNES (\pm ECART TYPES).....	51
TABLEAU 11. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EFFICACITE DES BANDES ENHERBEES A REDUIRE LA POLLUTION DIFFUSE SOUS PLUIES NATURELLES (ADAPTE DE DUCHEMIN <i>ET AL.</i> , 2004)	52
TABLEAU 12. SYNTHESE DE L'EFFICACITE DES OUVRAGES SUR LE DEBIT DE POINTE, LE VOLUME D'EAU ET LES PERTES EN TERRE SELON LE BASSIN VERSANT : MOYENNES (\pm ECART TYPES)	53
TABLEAU 13. RESULTATS DES ACTIONS D'ASSOLEMENT CONCERTE ET DE NON-LABOUR SUR LES DEUX BASSINS VERSANTS.....	54
TABLEAU 14. EFFICACITE DE LA GESTION DES FOSSES A RUEDERBACH	56
TABLEAU 15. RESULTATS D'AMENAGEMENTS COMBINES SUR LES DEUX BASSINS VERSANTS	62
ANNEXE I. PARAMETRES UTILISES SELON L'OCCUPATION DU SOL ET DE L'ITINERAIRE TECHNIQUE POUR LE MOIS DE MAI	75
ANNEXE II : SCRIPT.....	78
ANNEXE III. DIAGRAMME % VEGETATION	91
ANNEXE IV. PARAMETRE DU SOL	91
ANNEXE V. % CROUTE ET KSAT CROUTE.....	91
ANNEXE VI. RESULTATS DES SIMULATIONS AVEC <i>SPLASH DELIVERY RATIO</i> = 0.01 ET 0,5	92
ANNEXE VII. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR FACTEUR DE CALIBRATION $\psi=0.01$ ET $\psi=1.00$	93
ANNEXE VIII. RESULTATS DES SIMULATIONS POUR LE MODELE 1D ET 2D	94
ANNEXE IX. TABLEAU GLOBAL RESULTATS DES SIMULATIONS D'HYDRAULIQUE DOUCE A ECKWERSHEIM POUR LES FLUX DIFFUS.....	95
ANNEXE X. TABLEAU GLOBAL RESULTATS DES SIMULATIONS D'HYDRAULIQUE DOUCE A ECKWERSHEIM POUR LES FLUX CONCENTRES ET LES SCENARIOS DE COMBINAISON.....	96
ANNEXE XI. TABLEAU GLOBAL RESULTATS DES SIMULATIONS D'HYDRAULIQUE DOUCE A RUEDERBACH POUR LES FLUX DIFFUS	97
ANNEXE XII. TABLEAU GLOBAL RESULTATS DES SIMULATIONS D'HYDRAULIQUE DOUCE A RUEDERBACH POUR LES FLUX CONCENTRE ET LE SCENARIO COMBINE	98
ANNEXE XIII. RESULTATS DES SIMULATIONS EN PRENANT COMPTE LES BASSINS DE RETENTION, LES ASSOLEMENTS CONCERTES ET LE NON LABOUR A ECKWERSHEIM	99
ANNEXE XIV. RESULTATS DES SIMULATIONS AVEC LES ASSOLEMENTS CONCERTES LE NON LABOUR ET LES BANDES ENHERBEES LE LONG DES FOSSES A RUEDERBACH	100
ANNEXE XV. RESULTATS DES SIMULATIONS DE GESTION DES FOSSES A RUEDERBACH	101

1. Introduction

L'érosion est la troisième cause de dégradation des sols d'après le rapport de la Directive Cadre Européenne sur les Sols (Van-camp *et al.*, 2004). En Europe, 26 millions d'hectares sont touchés par l'érosion hydrique et 1 million d'hectares sont soumis à l'érosion éolienne (Oldeman *et al.*, 1990). Toutefois, l'activité humaine peut aggraver ce processus jusqu'à le rendre irréversible. On parle dès lors d'érosion aratoire, caus  e essentiellement par les machines agricoles et les pratiques de labour.

L'Alsace n'est pas épargnée par ce phénomène puisque 30% de la surface agricole utile (SAU) du territoire alsacien est sensible significativement à l'érosion et 17% des communes sont sujettes à un risque potentiel élevé de coulées d'eau boueuse (van Dijk *et al.*, 2015).

Pour lutter contre les coulées d'eau boueuse, de nombreux moyens existent, comme le changement d'itinéraire technique, qui tendent à abandonner le labour pour des techniques simplifiées comme le non labour ou le semis direct. Les cultures d'hiver forment un bon couvert végétal, limitant l'exposition du sol aux précipitations et aux phénomènes de battance, responsable des ruissellements. Enfin, des mesures plus palliatives existent comme les ouvrages d'hydraulique douce. Ceux-ci regroupent les bandes enherbées, les haies, les fascines et les bandes de miscanthus.

Dans le cadre de ce travail, l'influence de la localisation de ces quatre ouvrages a été étudiée. Leur position est variable spatialement et est fonction des types de flux rencontrés (diffus et concentré), qui sont fonction de la surface contributive en amont. Les ouvrages ont également été testés avec des largeurs différentes, de 5 ou 10 mètres pour les bandes enherbées et de miscanthus. Les haies sont composées de 3 ou 6 lignes.

Les différents scénarios ont été simulés par le logiciel openLISEM. C'est un modèle hydrologique   v  nementiel à base physique. Il permet la modélisation de l'érosion des sols à échelle du bassin versant. Il intègre un système d'informations géographiques (SIG).

Avant de traiter les résultats, une analyse de sensibilité du modèle a été faite pour comprendre le modèle et fixer les paramètres de celui-ci.

Sur base des résultats des simulations, l'objectif est de mettre en évidence des règles de décision pour guider le choix des ouvrages d'hydraulique douce dans un bassin versant. Ces règles seront proposées sous la forme d'un arbre de décision qui tient compte du type de flux, de la réduction des pertes en terre et du débit de pointe à l'exutoire.

D'autres simulations ont été proposées pour montrer l'influence d'un assolement concerté ou de la gestion des fossés.

Ce rapport est composé de quatre grandes parties. Tout d'abord, le contexte de l'étude et un état de l'art seront exposés. Ensuite, la méthodologie employée sera décrite. Les résultats seront présentés, interprétés et discutés. Enfin, une conclusion et des perspectives seront proposées.

2. Structure d'accueil et mission de stage

2.1. Description brève de l'ARAA

L'ensemble des travaux qui ont permis la réalisation de ce mémoire se sont déroulés entre mars et août 2017, à l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA).

L'Association a été créée en 1984 et compte 12 membres tels que des coopératives, des lycées agricoles, l'institut français de la vigne et du vin, l'Association des Producteurs de Céréales et d'Oléagineux du Haut-Rhin (APCO), ainsi que la Chambre d'agriculture Alsace, la chambre d'agriculture Grand Est et la Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DRAAF).

Les activités de l'ARAA sont organisées autour de deux programmes : un programme agronomique régional d'appui technique au conseil agricole (85%) et un programme de recherche et développement, en partenariat avec l'INRA de Colmar (15%). Les principaux modes de financements sont issus de la Région Grand Est, de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et des fonds européens agricoles pour le développement rural (FEADER).

Les travaux de l'ARAA ont pour objectif la production de références thématiques, la conception d'outils et méthodes, l'évaluation des pratiques agricoles et des pressions vis-à-vis de l'eau, ainsi que la mise en œuvre et le développement des modèles spatialisés (risque érosif, bilan carbone, etc.).

2.2. La place du stage effectué

Ce travail de fin d'étude s'inscrit dans la thématique « lutte contre l'érosion des sols et des coulées d'eau boueuse » et est un composant du projet multidisciplinaire GERIHCO 3 (Gestion des Risques et Histoire des Coulées boueuses). Ce projet est financé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, la région Grand Est, l'université de Strasbourg et l'École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg (ENGEES).

Les acteurs du projet GERIHCO sont des chercheurs issus d'unités de recherches multidisciplinaires (agronomie, économie, géographie) de l'Université de Strasbourg et de l'ENGEES, avec la collaboration de l'INRA de Colmar et de l'ARAA.

Le projet GERIHCO 3 s'articule autour de trois axes :

- 1. Agir en amont : changer les comportements et les pérenniser. L'attention se concentre sur la diffusion et la pérennisation des techniques culturales sans labour et des assolements concertés.
- 2. Analyse multicritère des dispositifs de génie végétal pour l'interception des sédiments. L'ambition de l'axe 2 est de réaliser une analyse multicritère (efficacité d'interception, rentabilité économique, acceptabilité sociale, risque invasif, biodiversité) de ces différents dispositifs.
- 3. Analyse paysagère des systèmes de haies, sous une approche pédo-historique et une approche à travers les perceptions.

Ce travail contribue à la réalisation d'une partie de l'axe 2 et tend de répondre à la question : « *Quelle(s) stratégie(s) spatiale(s) d'hydraulique douce (types de dispositif, localisation et densité d'installation) à l'échelle du bassin versant permet(tent) d'optimiser l'interception des flux et de limiter ainsi les coulées d'eau boueuse ?* ».

Pour répondre à cette question, le stage s'appuie sur la modélisation spatio-temporelle. La mission comporte différentes tâches, appliquées à deux bassins versants :

- Création des bases de données de la situation actuelle.
- Paramétrage des différents dispositifs d'hydraulique douce.
- Définition des scénarios spatiaux de l'hydraulique douce.
- Simulations et analyse des résultats.
- Proposition de règles de décision permettant de guider dans le choix de la localisation et le choix du type de dispositif d'hydraulique douce dans un bassin versant.

3. Problématique d'érosion et de coulées d'eau boueuse en Alsace

3.1. Définitions et facteurs

Le **phénomène d'érosion** est un détachement des particules de sol suivi d'un transport par un vecteur tel que l'eau, le vent ou encore le travail du sol (Poesen *et al.*, 1994). Ce travail ne s'intéresse qu'à l'érosion hydrique, qui est le phénomène le plus rencontré sur le territoire d'étude.

Différents facteurs peuvent accentuer le phénomène d'érosion hydrique :

- Le relief : plus la pente est forte, plus l'érosion sera importante.
- La texture du sol : les sols limoneux, plus battants, sont plus sensibles à l'érosion.
- La couverture du sol : elle permet de limiter l'impact direct des gouttes de pluie et la formation d'une croûte de battance. De plus, les r siduals végétaux ralentissent le ruissellement (Gillijns *et al.*, 2005).
- Le climat et les précipitations (Wischmeier *et al.*, 1978). L'énergie cinétique de la pluie détache les particules de sol puis les transporte par ruissellement vers des zones de dépôts. Une pluie est caractérisée par son intensité et sa durée. L'intensité de la pluie intervient sur la capacité à détacher les particules de sol et à les entraîner. La durée de la pluie joue sur les débits de ruissellement. Plus une pluie est longue, plus les quantités d'eau produites sont importantes, ce qui conduit à une augmentation du débit et des quantités de terre détachée. Enfin, plus une pluie s'abat sur une zone, plus l'état initial du sol est saturé et moins il est capable d'infiltrer l'eau. Dès lors, les débits et les pertes en terre augmentent.

Le **ruissellement**, à l'origine des processus d'érosion hydrique, peut être généré par différents mécanismes dont les deux principaux sont (Le Bissonnais *et al.*, 2002) :

- Le *ruissellement hortonien* qui apparait lorsque l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité d'infiltration. Les facteurs déterminants de ce processus sont l'intensité de la pluie d'un côté et les  tats de surface du sol (présence de croûtes de battance, couverture végétale, macroporosité, etc.) de l'autre. Ce ruissellement peut se produire à tous les endroits dans un bassin versant. Il est notamment fonction de l'occupation du sol et des  tats de surface présents.
- Le *ruissellement par saturation* qui se produit lorsque l'espace poral du sol est rempli jusqu'à la surface et toute l'eau de pluie supplémentaire fait déborder le « réservoir ». Les facteurs clefs de ce processus sont la quantité d'eau de pluie (plus que l'intensité), la réserve utile du sol, la facilité de drainage d'eau en profondeur. Il se produit notamment en fonction de la topographie dans les bas de vallons, proche des cours d'eau, ou éventuellement sur des sols avec des nappes perchées (présence d'une couche peu perméable à faible profondeur).

L'érosion hydrique peut prendre des formes différentes. Elle peut se manifester de façon diffuse sur le versant ou de manière plus concentrée dans les talwegs (Le Bissonnais *et al.*, 2002).

Les conséquences de ces ruissellements sont pour les parcelles agricoles : la perte de la couche arable, la perte de rendement, le lessivage des semences (Figure 1). Le transfert vers l'aval du ruissellement chargé en sédiments peut donner lieu à des **coulées d'eau boueuse**, destructrices pour les habitations, ou qui sédimentent les cours d'eau et les polluent (Gillijns *et al.*, 2005).



Figure 1. Exemples d'érosion au sein de parcelles agricoles (pomme de terre, maïs, oignons)    Eckwersheim, le 15/05/2017 (   H. Leduc)

L'expression « coulées de boues » pouvant prêter à confusion, l'expression « coulées d'eau boueuse » sera utilisée dans ce rapport. La coulée d'eau boueuse est définie comme étant un écoulement fluide et rapide d'eau de surface, chargée en matières en suspension. Ce processus est rencontré dans des zones de plaine et de plateaux limoneux, dans les zones cultivées du nord de l'Europe.

A contrario, des écoulements visqueux peuvent se manifester sous forme de mouvements de masse. Ce phénomène se rapproche du glissement de terrain, qui est principalement d   à la gravité (Le Bissonnais *et al.*, 2002). On retrouve ces processus en région montagneuse ou de piémont.

3.2. Ampleur et évolution du phénomène des coulées d'eau boueuse en Alsace

En Alsace, l'érosion des sols est favorisée par la co  incidence de plusieurs conditions, à savoir : (1) des fortes pluies souvent orageuses de printemps et de début d'été, (2) des cultures de printemps qui ne couvrent que très faiblement le sol, (3) un relief plus ou moins prononcé, et (4) des sols sensibles à l'érosion et notamment les sols limoneux.

Au-delà des facteurs d  j   mentionn  s qui favorisent l'érosion, des facteurs favorisant ces   v  nements et les dégâts sont : (a) la localisation des zones bâties sur les chemins d'eau de ruissellement, (b) une

faible résistance hydraulique des surfaces parcourues par l'eau de ruissellement vers l'aval. Cette faible résistance se produit notamment en cas de grandes parcelles peu couvertes par la végétation, et en cas d'absence des éléments paysagers pouvant ralentir et/ou diminuer les flux. Le processus de transfert dépend donc fortement de la structure du paysage.

Le phénomène d'érosion et de coulées d'eau boueuse sont des problèmes majeurs en Alsace qui semblent s'amplifier ces dernières années.

En 2007, l'ARAA a conduit une étude permettant d'évaluer la sensibilité des terres à l'érosion par la méthode MESALES (Figure 2) à l'échelle de l'Alsace (van Dijk *et al.*, 2009). L'étude montre que les secteurs alsaciens touchés par l'érosion des sols se trouvent principalement dans les collines limoneuses de grandes cultures (Outre-Forêt, Vallée de la Zorn, Kochersberg et Arrière-Kochersberg, et le Sundgau) et dans une moindre mesure dans les collines viticoles du piémont des Vosges. 30% de la surface agricole utile (SAU) du territoire alsacien est significativement sensible à l'érosion (van Dijk *et al.*, 2016). Les données statistiques concernant les dossiers de catastrophes naturelles (CatNat) montrent qu'entre 1985 et 2014, 204 communes ont été touchées au moins une fois par des coulées d'eau boueuse en Alsace (van Dijk *et al.*, 2016). La période la plus à risque s'étend de mai à juillet.

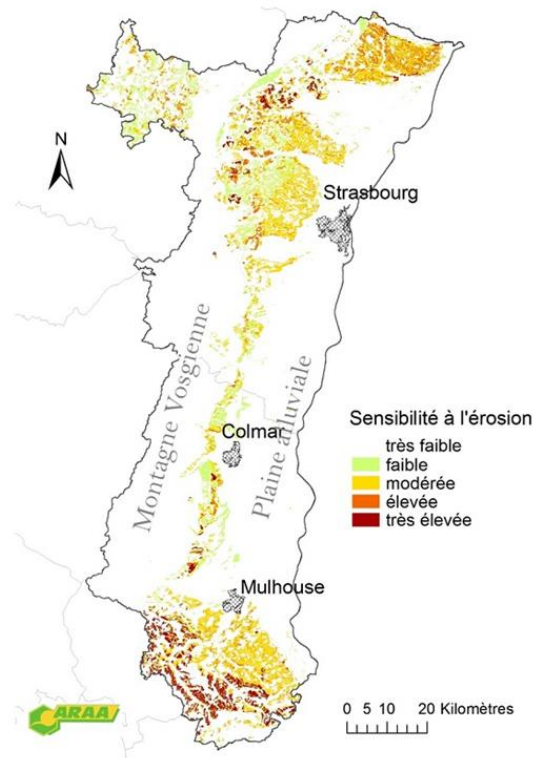


Figure 2. Sensibilité à l'érosion en 5 classes selon la méthode MESALES (van Dijk *et al.*, 2009)

De plus, la fréquence des coulées d'eau boueuse est en augmentation dans le Bas-Rhin : la moyenne annuelle de nombre de dossiers CatNat reconnus est passée de 4 pour la période de 1985 à 1994 à 8 pour la période de 2005 à 2014 (van Dijk *et al.*, 2016).

Plusieurs évolutions sur le territoire alsacien et des facteurs climatiques sont à l'origine de cette augmentation. L'article de van Dijk *et al.* (2016) reprend les principales causes de cette évolution.

Premièrement, de nombreuses communes ont pratiqué un remembrement visant à augmenter la taille moyenne des parcelles. La structure paysagère est alors affectée par la suppression des éléments

paysagers comme les haies et les talus, ce qui conduit à des transferts de flux plus faciles entre les parcelles.

Deuxièmement, la pluviométrie et la température annuelles ont augmenté durant les 40 dernières années (Figure 3). Ces augmentations peuvent mener à une augmentation de l'érosivité de la pluie.

Période	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010
T (°C), moyenne annuelle	10,0	10,1	10,5	11,0
P (mm), moyenne des sommes annuelles	585	611	631	665

Figure 3. Evolution de la pluviométrie et de la température en Alsace sur les 40 dernières années (van Dijk *et al.*, 2016)

De plus, la distribution temporelle des pluies a tendance à se déplacer plus tôt dans l'année. Le pic des précipitations est atteint à la fin du printemps, début de l'été (Figure 4). Le risque d'érosion est dès lors plus important étant donné le faible développement des cultures de printemps.

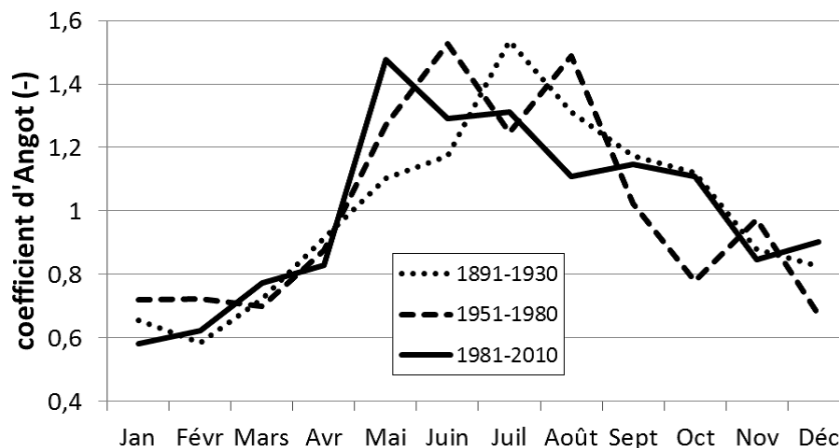


Figure 4. Distribution temporelle des précipitations sur une année en Alsace (van Dijk *et al.*, 2016)²

Troisièmement, la superficie des terres labourables a augmenté, et en contrepartie on observe une diminution de la part des surfaces en herbe, des terres fourragères et des surfaces utilisées par les céréales à paille (Figure 5).

² Le **coefficient d'Angot** est le rapport entre la pluviométrie du mois et la pluviométrie annuelle rapportée au mois (Gilbert *et al.*, 1997)

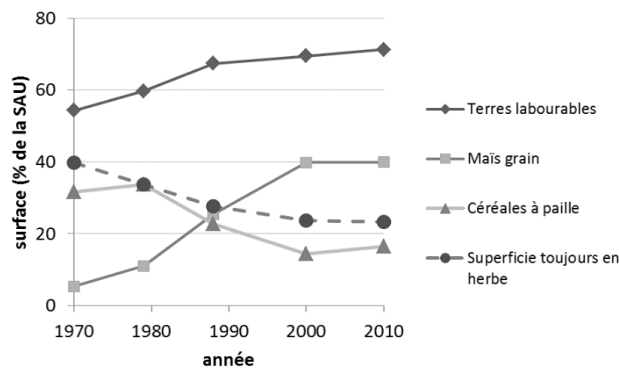


Figure 5. Evolution de la part des terres labourables, du maïs grain, des surfaces en herbe et des céréales à paille dans la SAU (van Dijk et al., 2016)

Quatrièmement, les teneurs en carbone organique dans les sols ont diminué dans 2/3 cantons alsaciens étudiés. Or, le carbone est un élément important dans la stabilité structurale des sols. L'état humique des sols a été impacté par les effets du changement climatique et notamment par l'augmentation des températures qui accélère la minéralisation. De plus, la part de l'élevage a diminué et donc les apports de déjections animales également.

Cependant, l'augmentation des surfaces en maïs grain favorise la restitution des résidus de culture, contrairement aux céréales à paille où les résidus sont très souvent exportés.

On peut aussi ajouter l'impact des machines agricoles de plus en plus lourdes, qui compactent le sol et diminuent l'infiltrabilité de l'eau. Enfin, l'apport d'intrant et les pratiques de labour affectent l'activité biologique des sols, diminuant leur porosité et augmentant leur érodibilité.

3.3. Contexte de l'Alsace

Toutes les petites régions d'Alsace possèdent des caractéristiques physiques et géomorphologiques conduisant à une sensibilité au phénomène d'érosion plus ou moins forte.

Le territoire alsacien est composé de deux départements : le Bas-Rhin et le Haut-Rhin. La superficie est de 8300 km², ce qui représente 1,5 % de la superficie du territoire français.

3.3.1. Climat

La plaine d'Alsace (Figure 6) est caractérisée par un climat semi-continentale profitant de l'effet Foehn (Profil environnemental d'Alsace). Elle est abritée de l'influence des masses d'air océaniques par les Vosges. Les étés sont chauds et humides (température moyenne de 20°C) et les hivers sont froids et secs (température moyenne proche de 0°C). Lorsque l'on s'élève au-delà de 600 mètres, le climat est dit de basse à moyenne montagne. Les températures observées sont plus faibles (hiver froid avec enneigement) et les précipitations sont plus abondantes, plus de 2000 mm sur les sommets (600 mm dans la plaine de Colmar et Rouffach) avec des orages fréquents en été, notamment dans l'Outre-Forêt, en Alsace Bossue et dans le Sundgau (Météo France).

3.3.2. Géologie et pédologie

Il y a 65 millions d'années, les Vosges et la Forêt-Noire ne formaient qu'un seul massif s'élevant jusqu'à trois mille mètres. À la suite de la formation des Alpes, deux lignes de cassures parallèles se formèrent dans le massif. La zone comprise entre ces deux fractures s'effondra progressivement et fut envahie par la mer, la comblant en partie de dépôts marins. Plus tard, le Rhin s'insinua dans ce fossé y apportant des alluvions formant la plaine du Rhin (ARAA, 2012).

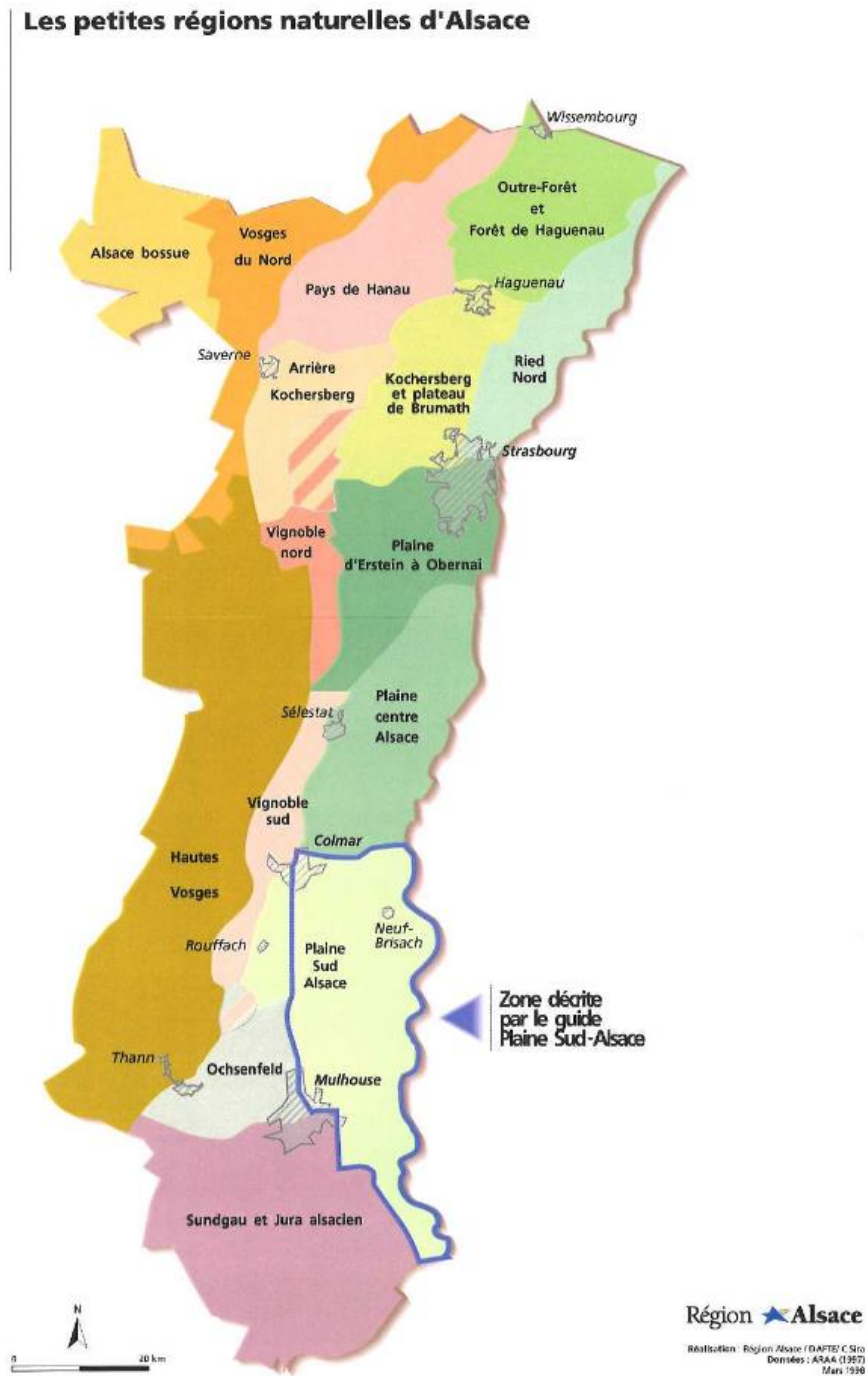


Figure 6. Petites régions naturelles d'Alsace (Party et al., 1999)

Au cours du Quaternaire et lors des périodes glaciaires, les formations sédimentaires du Rhin en place sont recouvertes par les dépôts de loess.

Le relief du territoire alsacien est décomposé en 3 grands ensembles morphologiques à savoir (Figure 7) :

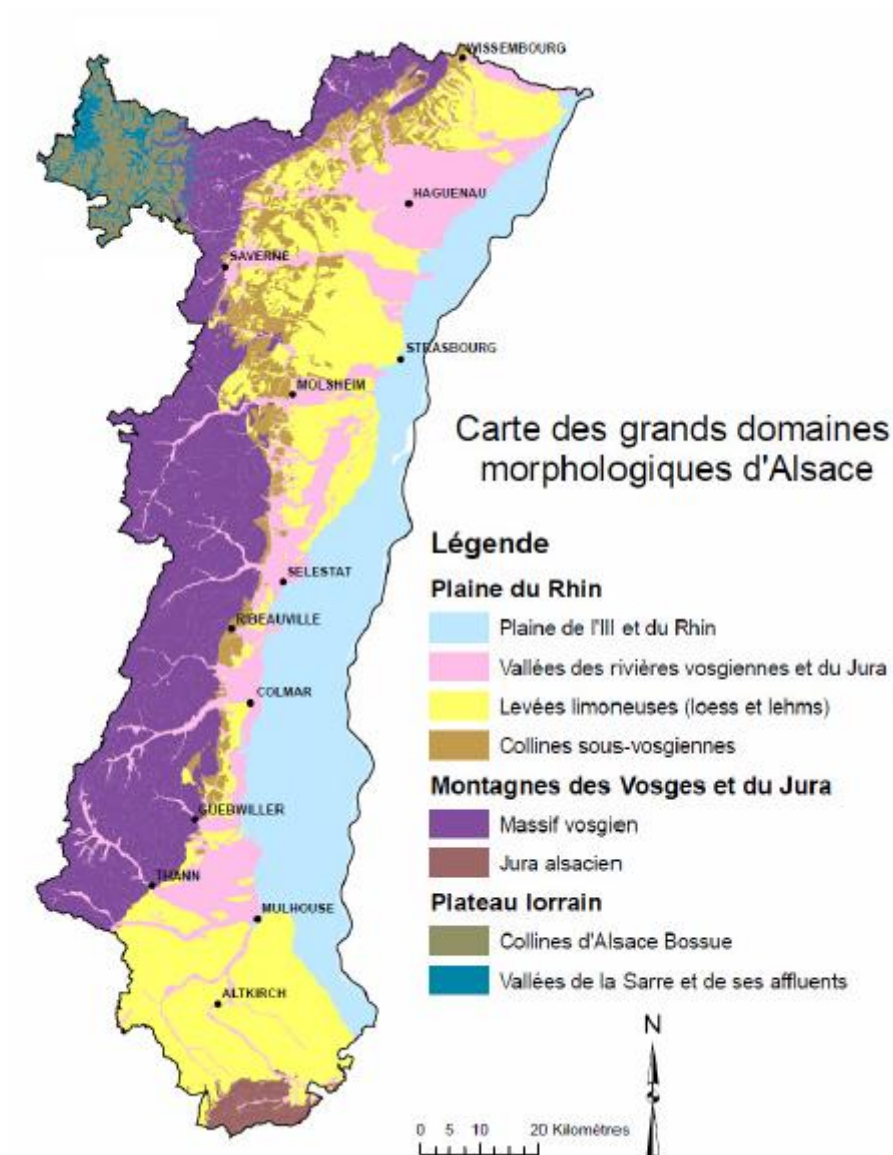


Figure 7. Carte des grands domaines morphologiques d'Alsace (ARAA, 2012)

- Le plateau lorrain situé au nord-ouest de la région.
- La montagne vosgienne avec les Vosges de plus basse altitude au nord (de 400 à 1000m) et les Vosges de haute altitude au sud (point culminant Grand Ballon à 1424m).
- Le fossé rhénan composé des collines sous-vosgiennes, les collines limoneuses et de la plaine alluviale du Rhin drainée par le Rhin et ses affluents.

Les levées limoneuses d'apport éolien présentes en Alsace sont associées à des sols limoneux calciques et calcaires profonds. On les retrouve notamment dans les régions du Kochersberg, de l'Outre Forêt, dans le Sundgau (Figure 6). Ces sols représentent quelques dizaines de milliers d'hectares à travers l'Alsace et sont connus pour être fertiles (ARAA, 2012).

La région du Kochersberg est un plateau recouvert d'une épaisse couche de limon pouvant dépasser les 30 mètres. Les ruisseaux comme la Souffel et le Muelbechel entaillent ce plateau d'ouest en est.

La région du Sundgau peut être divisée en trois parties : bas, moyen et haut Sundgau. Le Haut-Sundgau est couvert de limons lehmifiés datant de l'âge Riss. Cette couche repose sur le cailloutis du Sundgau, issus des Alpes et déposé par l'ancien cours du Rhin.

Ces deux régions, de par leur pédologie, font partie des régions d'Alsace où les phénomènes d'érosion sont les plus importants.

La nappe d'eau souterraine présente dans le cailloutis du Sundgau est la plus importante de la région (60%) (Party, 2001).

3.3.3. Occupation du sol

On distingue sur le territoire alsacien trois grands ensembles d'occupation du sol : les espaces urbains et industriels (20%), les espaces forestiers (40%) et les espaces agricoles (40%) (Agreste, 2015).

En outre, les forêts majoritairement retrouvées dans les Vosges, sont également présentes dans les plaines du Rhin et du Ried de l'Ill (forêts alluviales).

Les espaces agricoles se situent à des endroits bien spécifiques. Ainsi, l'agriculture de type agro-pastorale est localisée dans les collines, le Haut-Sundgau et dans les espaces ouverts des Vosges. Elle représente 35% de la SAU du territoire alsacien. Les vignes (5% de la SAU) se retrouvent dans les zones de piémonts. Enfin, les grandes cultures sont localisées dans les plaines de l'Ill et du Rhin, dans les régions limoneuses, et représentent 60% de la SAU. 40 % de la SAU est consacré à la culture de maïs et 15% à celle des céréales à pailles (Agreste, 2015).

Dans la région du Kochersberg, par la présence d'une épaisse couche limoneuse, on retrouve une polyculture diversifiée avec la culture de maïs, des céréales (orge, blé) et d'autres cultures comme le houblon, la betterave sucrière, la pomme de terre et le tabac (Lebreton-Thaler, 2001).

3.4. Moyens de lutte contre l'érosion

Pour limiter l'aléa érosif, il existe plusieurs actions : des méthodes de lutte qui ont pour but de réduire la production et la vitesse de ruissellement dans les parcelles et le départ des particules de terres, d'autres jouent un rôle sur l'interception des sédiments et sur leur chemin de transport vers l'aval.

Par exemple, les techniques culturales sans labour (TCSL) peuvent fortement réduire les volumes de ruissellement et l'érosion. Des mesures à l'échelle de la parcelle agricole dans le Sundgau ont montré des réductions des volumes d'eau de ruissellement de 50 à 100% en fonction de la pluviométrie (van Dijk *et al.*, 2013). La mise en place d'assolements concertés a pour but de réunir l'ensemble des agriculteurs présents sur un territoire pour discuter des cultures qui seront présentes dans les bassins versants. Cette négociation a pour but de diversifier l'ensemble des cultures sur un territoire et de pouvoir avoir un *patchwork* de cultures pour intercepter les flux (Figure 8). Par exemple, au mois de mai, une parcelle bien couverte en blé en aval d'une parcelle en maïs peu couverte, interceptera les flux d'eau et de sédiments et restituera en bout de parcelle des quantités d'eau et de sédiments plus faibles.



Figure 8. Exemple d'assolement concerté

D'autres solutions, plus palliatives, existent comme les ouvrages d'hydraulique douce dont le but est d'infiltrer et de ralentir les flux d'eau et de retenir les sédiments. Certains sont autor  g  n  ratifs, d'autres ont une durée de vie plus courte. Certains ont en outre un rôle d'interception des flux en lien avec le ruissellement, des fonctions paysagères, de biodiversité et peuvent être valorisés.

Le chapitre 4 revient plus en détail sur l'impact des éléments paysagers sur ces processus de ruissellement et d'érosion.

3.5. Objectifs du travail

Ce travail s'inscrit dans le deuxième axe³ du projet GERHICO et fait suite à un premier travail de fin d'étude réalisé en 2016 (Friconnet, 2016). Celui-ci a permis à partir des observations et mesures sur le terrain de caractériser les différents types de dispositifs d'hydraulique douce sous forme de paramètres hydrauliques et d'infiltration utiles pour la modélisation. L'efficacité de rétention en sédiments de ces dispositifs a été évaluée à l'échelle du versant.

Ce mémoire s'intéresse à l'évaluation de l'efficacité des programmes d'action d'hydraulique douce à l'échelle d'un bassin versant dans le but de les optimiser. La finalité est de contribuer à la réduction des coulées d'eau boueuse en Alsace. Lors de ce travail, des dispositifs d'hydraulique douce ont été testés pour réduire les débits et les pertes en terre à l'exutoire. L'objectif étant de déduire des stratégies génériques de localisation des ouvrages sur un bassin versant.

Pour ce faire, des scénarios sont élaborés sur deux bassins versants pour chaque dispositif d'hydraulique douce (bande enherbée, bande de miscanthus, haie et fascine) en fonction de leur largeur et de la nature de l'écoulement entrant (diffus ou concentré). Le modèle openLISEM sera utilisé pour simuler les différents scénarios. Sur la base des résultats, des règles de décision seront déduites. Enfin, des scénarios combinés seront proposés et évalués.

³ Axe 2 : Les différentes techniques à mettre en place en aval du phénomène d'érosion (dispositifs d'hydraulique douce) pour réaliser une analyse multicritère de ces ouvrages

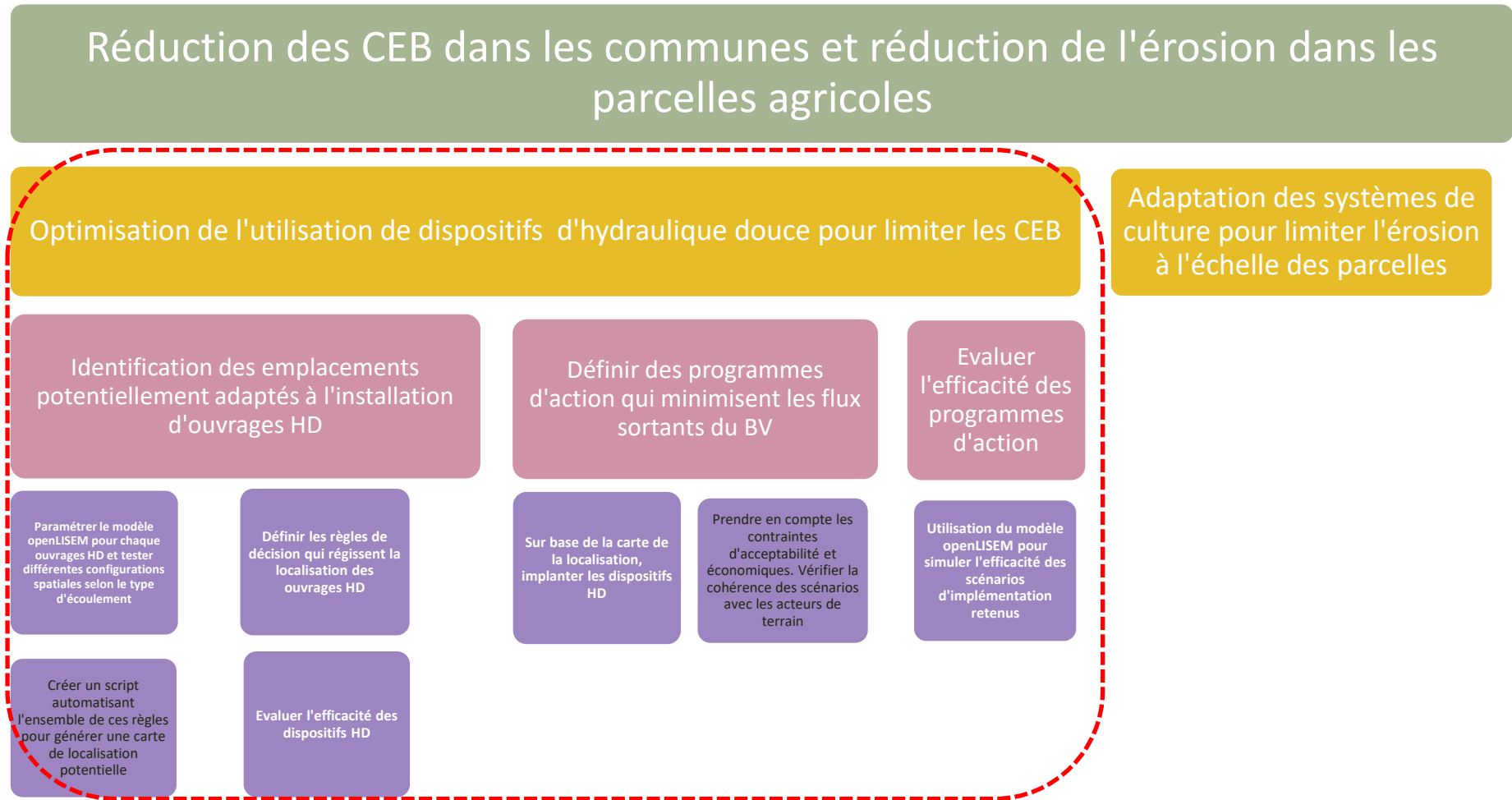


Figure 9. Organigramme des objectifs du travail

Les objectifs de travail ont été divisés en plusieurs niveaux. Le premier niveau est la finalité à obtenir, c'est-à-dire la réduction des coulées d'eau boueuse dans les communes et de l'érosion dans les parcelles agricoles. Pour y arriver, deux voies sont proposées : une approche par des ouvrages d'hydraulique douce et une autre par des modifications des systèmes de culture (itinéraire technique, intercultures, rotation, etc.). Cette deuxième approche ne fait pas partie de ce rapport.

Enfin, pour atteindre les objectifs déclinés, des actions ont été réalisées. La Figure 9 reprend l'ensemble de celles-ci. En noir, ce sont les tâches qui ne font pas partie de la mission de stage et qui seront abordées ultérieurement par l'ARAA.

4. Etat de l'art sur le rôle de l'hydraulique douce dans les problématiques de ruissellement et d'érosion

4.1. Caractéristiques des ouvrages d'hydraulique douce

Il existe de nombreux ouvrages qui permettent de retenir les sédiments, de ralentir les flux d'eau et de favoriser l'infiltration. Outre des sédiments, une partie des pesticides, des nitrates et d'autres éléments de pollution diffuse sont également retenus par ces dispositifs. Seuls les aspects « rétention de sédiments » et impacts sur le ruissellement seront développés dans ce mémoire. Le présent chapitre a pour but de faire l'état de l'art de ces ouvrages et d'en donner les principales caractéristiques qui contribuent à la réduction de l'érosion et du ruissellement.

Le choix s'est porté sur la dénomination d'ouvrages « d'hydraulique douce » plutôt que de « génie végétal ». Les ouvrages présentés ont tous des fonctions jouant sur l'hydraulique, alors que l'expression « génie végétal » pourrait porter à confusion et sous-entendre des ouvrages « vivants ». L'adjectif « doux » désigne le fait que ces ouvrages ne nécessitent pas de lourds travaux de mise en place et que leur emprise dans le paysage est limitée.

4.1.1. Les fascines

Les **fascines** sont des barrières végétales constituées à partir de fagots de bois morts qui sont superposés et retenus par deux rangées de pieux (Figure 10). Lorsque tous les éléments constitutifs de la fascine sont en bois mort, on parle de fascines mortes. Quand l'un des constituants, les pieux ou les tiges enfoncées dans le sol, est vivant, ce sont des fascines dites vivantes (Richet *et al.*, 2016 ; Ouvry *et al.*, 2012). L'espèce la plus utilisée dans la fabrication des fascines est le saule.



Figure 10. Fascine morte (© Paul van Dijk)

Le principal avantage de la fascine est son efficacité qui est immédiate et importante. Les fascines réduisent la charge en sédiments dans les eaux de ruissellement. Leurs principaux inconvénients sont une faible durée de vie (environ 5 à 7 ans) et des coûts élevés de mise en place. De plus, leur efficacité décroît au fur et à mesure des événements par l'accumulation des sédiments (Richet *et al.*, 2014).

Le coefficient de Manning, n [$s/m^{1/3}$], est utilisé pour caractériser l'efficacité du freinage hydraulique de l'ouvrage. Ce coefficient représente donc les forces de frottement et il permet de calculer la vitesse du ruissellement selon l'équation suivante (Ouvry *et al.*, 2012) :

$$v = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} p^{\frac{1}{2}}$$

Avec,

R_h , le rayon hydraulique de l'écoulement (périmètre mouillé de l'écoulement) [m]

p , le gradient d'énergie = la pente (généralement) [-]

L'étude d'Ouvry *et al.* (2012) en Haute-Normandie a mis en évidence le rôle des fascines dans la réduction de la hauteur de la lame d'eau et dans la diminution de la vitesse d'écoulement pour trois débits donnés. La présence d'une fascine divise les vitesses d'écoulement par trois, ce qui permet la sédimentation des particules de sol en amont des fascines. De plus, une grande variabilité du coefficient de Manning est observée (0,15 à 2,9 $s/m^{1/3}$) lorsque les débits sont faibles. Lorsque le débit augmente, les valeurs du coefficient de Manning se stabilisent aux alentours de 0,4    1 $s/m^{1/3}$. Cette variabilité peut trouver son origine dans les différents types de bois utilisés, dans la densité de remplissage, dans la forme des fascines ou bien encore dans l'âge de celles-ci (Richet *et al.*, 2016).

La densité volumique interne de la fascine est l'un des paramètres les plus importants dans l'efficacité des fascines pour réduire les vitesses d'écoulement. Le seuil de 40% comme densité volumique est avancé par Ouvry *et al.* (2012), en dépassant ce seuil, le coefficient de Manning devient supérieur à 1 $s/m^{1/3}$.

Concernant la rétention de sédiments, ceux-ci sont déposés derrière le ressaut hydraulique, aux endroits où les vitesses sont réduites. La granulométrie des sédiments est un facteur important, car elle influence le taux de transfert des sédiments. Les plus grossiers sont transportés moins loin que les sédiments plus fins. L'efficacité des haies et des fascines montre un taux de sédimentation allant de 74 à 99% sur le total des apports (Ouvry *et al.*, 2012).

Les fascines vivantes peuvent également modifier l'infiltrabilité. Les capacités maximales d'infiltration à saturation varient de 0 à 530 mm/h. Les valeurs les plus faibles sont observées lorsque la fascine vivante est jeune. Une piste avancée par Ouvry *et al.* (2012) serait que les fascines vivantes jeunes ont une activité biologique plus faible en profondeur.

Enfin, Richet *et al.* (2016) a mis en évidence une grande variabilité d'efficacité d'infiltration, de rétention de sédiments et de réduction des vitesses d'eau par les fascines selon leur type (morte ou vivante), selon leur taille, leur forme et leur âge.

4.1.2. Les haies

Les **haies arbustives** se rapprochent des fascines vivantes. Elles sont composées d'arbres et d'arbustes alignés qui se développent sur une végétation herbacée présente à leurs pieds (Figure 11).



Figure 11. Haie arbustive ( Paul van Dijk)

De par leur système racinaire bien développé, les haies permettent une bonne infiltration de l'eau à terme. L'efficacité d'une haie n'est pas immédiate. Environ 15 ans sont nécessaires pour que la haie possède de bonnes caractéristiques pour retenir les sédiments et infiltrer l'eau (Richet *et al.*, 2014).

Les résultats de l'étude d'Ouvry *et al.* (2012) sur des haies arbustives montrent que les haies les plus anciennes ont un coefficient de Manning plus important (jusqu'à 0,35 s/m^{1/3} pour des débits sp cifiques⁴ supérieurs à 5 l/s/ml). Ceci s'explique principalement par une forte densité de pieds, qui ont tendance à freiner l'écoulement. De plus des observations sur le terrain ont montré une accumulation de *mulch* au pied de haies (Figure 12). Celui-ci peut bloquer les sédiments et réduire les vitesses d'écoulement.



Figure 12. Végétation au pied d'une jeune haie arbustive   Alteckendorf, le 13/03/2017 ( Paul van Dijk)

⁴ Le **débit spécifique** est un débit par unité de superficie de bassin versant exprimé généralement en litres/seconde/km² (http://www.hydro.eaufrance.fr/glossaire.php#debit_specifique). Dans ce cas-ci, le débit est mesuré non pas pour un bassin versant, mais pour des ouvrages d'hydraulique douce, la mesure est exprimée en litres/seconde/mètre de linéaire d'ouvrage (l/s/ml).

Les capacités d'infiltration d'une haie arbustive, âgée d'au moins 5 ans, sont supérieures à celles des fascines. En moyenne, l'infiltration d'une haie est de 400 (\pm 100) mm/h (Ouvry *et al.*, 2012).

En plus des fonctions anti-érosives, les haies sont des zones de refuges pour la biodiversité entre les zones plus « sauvages » et les espaces ouverts (Morgantini *et al.*, 2005).

4.1.3. Les bandes de miscanthus

Les **haies herbacées** sont composées de plantes herbacées, comme par exemple le miscanthus et le v tiver (Figure 13). Ces ouvrages d'hydraulique douce sont déjà fortement utilisés dans les régions tropicales et aux Etats-Unis (Richet *et al.*, 2016). En Alsace, c'est le miscanthus *giganteus* qui est utilisé. Cette grande plante peut être plant e en forte densité pour ralentir les écoulements d'eau. De plus, grâce à son port droit et sa tige rigide, le miscanthus *giganteus* ne se couche pas lors des  v nements orageux.



Figure 13. Bande de miscanthus (  Paul van Dijk)

Les couverts herbacés possèdent de nombreux avantages. Ils limitent la formation d'une croûte de battance grâce à leur feuillage qui protège la surface du sol. La matière sèche produite tombe au sol et enrichit le sol en matière organique, ce qui lui confère une plus grande stabilité structurale et une meilleure porosité (Ouvry *et al.*, 2010).

Une étude de Richet *et al.* (2014) a testé un ensemble de haies herbacées selon la variété utilisée, la couverture au sol (*mulch* ou paillis), le développement de ces haies ( ge) et les particularités (trous au sein de la haie). Les coefficients de Manning de ces ouvrages varient largement de 0,1   1 s/m^{1/3}. Les premiers résultats de cette étude montrent que les freins hydrauliques des haies herbacées ont des efficacités proches de la gamme des fascines mortes, soit un frein hydraulique supérieur à 0,5 s/m^{1/3}.

Le rôle des trouées dans les haies a été mis en évidence. Le frein hydraulique est peu influencé lorsque la trouée représente moins d'un tiers de la largeur totale pour des débits spécifiques de moins de 2 l/s/ml. Au-delà de ces débits, la trouée doit être réduite à 15% de la largeur totale de la haie.

L'efficacité du *mulch* a également été démontrée (Figure 14). En effet, celui-ci permet d'obtenir un coefficient de Manning de l'ordre de 0,65 s/m^{1/3}. Ce coefficient diminue de moitié en l'absence de couvert végétal au pied de l'ouvrage.



Figure 14. Mulch présent au pied du miscanthus (  Paul van Dijk)

Les capacités d'infiltration de ces ouvrages sont similaires aux capacités d'infiltration de l'herbe, soit une capacité médiane de 140 mm/h pouvant s'étendre entre 0 à 500 mm/h.

Les informations suivantes proviennent majoritairement de la synthèse bibliographique de Yuan *et al.* (2009).

Concernant le choix des espèces pour la formation de haies, celui-ci repose sur le VSI (*vegetative stiffness index*). Cet indicateur est fonction de la densité des tiges et du diamètre moyen de celles-ci exprimé en pouce (Richet *et al.*, 2014). Dans cette étude, le *Miscanthus giganteus* paraît le plus adapté devant le *Carex pendula*, *Festuca mairei* (F tuque) et le *Panicum virgatum* (Panic érigé ou Millet vivace). L'étude de Meyer *et al.* (1995) avait déjà retenu trois espèces propices telles que le v tiver, *Panicum virgatum* associé à la F tuque en bande étroite ou encore *Panicum virgatum* seul, en bande plus large. D'autres espèces peuvent aussi être considérées comme le mimosa et le mûrier (Kim *et al.*, 2008).

L'étude de Gilley *et al.* (2000) analyse l'efficacité des haies herbacées. Celles-ci réduisent les pertes en terre, et les haies formées par le *Panicum virgatum* (*switchgrass*) d'une hauteur de 0,72 m diminuent de 63% les pertes en sol.

En 1999, McGregor *et al.* ont mis en évidence la capacité des haies à réduire le ruissellement de 5 à 7%, respectivement en labour et en non-labour, ainsi que les pertes en terre : des diminutions de 57   75% ont été observées selon que la parcelle était labourée conventionnellement ou non.

Concernant les pratiques d'implantation du miscanthus, en Alsace, le sol est tout d'abord préparé et l'ensemble des adventices vivaces sont détruites. De plus, un entretien est préconisé pendant les deux premières saisons (désherbage). Dès la troisième année, l'entretien est nul (Richet *et al.*, 2014).

L'espèce de miscanthus préconisé est le *Miscanthus giganteus*. Celui-ci est issu d'une hybridation entre *Miscanthus sinensis* et *Miscanthus sacchariflorus*. Ces deux espèces parentes sont considérées comme invasives du point de vue des  cologues. Pourtant, le code de l'environnement ne reconnaît pas ces espèces comme des espèces envahissantes. Cependant, l'hybride, stérile, semble non invasif. Plusieurs études sont en cours pour étudier le risque potentiel invasif de cette espèce.

4.1.4. Les bandes enherbées

Les **bandes enherbées** sont des bandes mêlant plusieurs espèces végétales (indigènes ou implantées) qui ont été plant es pour contribuer à la biodiversité et au paysage (Le Bissonnais *et al.*, 2004 ; Richet *et al.*, 2016) (Figure 15). En effet, elles ralentissent et infiltrent les eaux de ruissellement et retiennent également les sédiments et les polluants (Gril *et al.*, 2007). Les végétaux induisent une rugosité qui

ralentit la vitesse des écoulements et qui diminue le transport des sédiments et des contaminants. La taille des sédiments a une grande importance. En effet, les particules les plus grosses (limons et sables) sont déplacées sur de faibles distances alors que les argiles sont transportées sur des distances plus importantes (Duchemin *et al.*, 2004).



Figure 15. Bande enherbée en aval d'une parcelle agricole (©Paul van Dijk)

Plusieurs études se sont penchées sur les propriétés des bandes enherbées. Il apparaît que l'efficacité des bandes enherbées dépend de la pente, de la densité, de l'entretien, de l'âge, de la largeur de la bande (van Dijk *et al.*, 1996 ; Le Bissonnais *et al.*, 2004) et des végétaux présents (Blanco-Canqui *et al.*, 2004). L'efficacité augmente avec la largeur de la bande et diminue avec le degré de la pente, le volume ruisselé et le taux d'humidité (Spatz *et al.*, 1997)

Il apparaît qu'une bande enherbée de 6 mètres de large infiltre jusqu'à 80 % du ruissellement, contre 60% pour une largeur de 3 mètres. En moyenne, l'infiltration de l'eau par une bande enherbée réduit en moyenne le ruissellement de 54%, avec une gamme allant de 40 à 80% (Corpen, 2007).

Les couverts végétaux permettent une résistance physique à l'écoulement (frein), caractérisée par un coefficient de Manning supérieur aux sols nus. Ceci engendre des vitesses d'écoulement plus faibles. De plus, les agrégats sous couvert végétal possèdent une meilleure agrégation et sont moins sensibles au détachement des particules (Govers *et al.*, 1987).

Le Bissonnais *et al.* (2004) montre qu'une bande enherbée de 6 mètres de large réduit la concentration en sédiment d'un facteur quatre. Les pertes en sol sont réduites entre 76 et 98% selon l'événement (intensité et durée de la pluie). Ces taux sont en adéquation avec l'étude Gabor *et al.* (2001) qui présente un taux de rétention des sédiments entre 75 à 91%.

L'étude de Rey (2004) se situe dans les Alpes-de-Haute-Provence et a pour but de mettre en évidence l'efficacité des barrières végétales dans la retenue des sédiments. Cette étude démontre le rôle de la microtopographie dans la capture des sédiments. Comme l'ont déjà démontré de nombreux auteurs (Bergkamp *et al.*, 1996 ; Bryan and Brun, 1999 ; Chappell *et al.*, 1999 ; Valentin *et al.*, 1999 cité par Rey, 2004), les barrières végétales ne sont pas figées dans le temps. Les dépôts de sédiments permettent le développement de la végétation et d'infiltrer mieux l'eau, d'augmenter la profondeur de sol et de stabiliser le sol créant ainsi des conditions propices au développement de la végétation. Enfin l'efficacité des barrières végétales augmentent avec le temps, grâce au développement de la végétation.

L'étude de Rey (2004) a mis en évidence une relation linéaire entre l'aire de la surface érodée et la surface de bande enherbée efficace en aval. Gr  ce à cette relation, la dimension nécessaire pour retenir un maximum de sédiments par une barrière végétale peut être estimée. Cette estimation tient compte du facteur pente. Une plus grande surface végétalisée est nécessaire lorsque les pentes sont plus fortes.

Duchemin *et al.* (2004) met en évidence l'efficacité des bandes enherbées pour piéger les sédiments et les polluants dissous lorsque le ruissellement est diffus et uniforme. Au contraire, des entrées ponctuelles d'un ruissellement à fort débit spécifique réduit très fortement l'efficacité de rétention des sédiments par les bandes enherbées (van Dijk *et al.*, 1996). Dans ce cas, l'effet de l'infiltrabilité élevée de la bande enherbée n'affecte que de façon marginale les débits sortants de la bande enherbée.

D'un point de vue réglementaire, des bandes enherbées doivent être placées le long des cours d'eau afin de les protéger. Les bandes enherbées jouent le rôle de bandes tampon pour protéger les sols des risques érosifs mais également de la pollution diffuse pour maintenir une bonne qualité d'eau. Dans le département du Bas-Rhin et du Haut-Rhin, les cours d'eau concernés par la mesure de l'arrêté du 24 avril 2015, modifié le 13 février 2017, sont les cours d'eau représentés en trait bleu plein et en train bleu pointillé nommés sur les cartes IGN au 1/25000^e (Legifrance, 2015). La largeur des bandes doit être d'au minimum 5 mètres à partir du bord du cours d'eau. Le couvert doit être permanent. Le choix des espèces est laissé à l'exploitant. Toutefois les espèces invasives, les légumineuses « pures » sont prosrites (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2015).

4.2. Autres ouvrages agissant sur les transferts des flux

4.2.1. Les bassins de rétention

Les bassins de rétention sont des dispositifs permettant de retenir une partie du ruissellement et de l'évacuer à un débit plus faible et contrôlé. De plus, ce bassin permet la sédimentation des matières en suspension dans l'écoulement. Ce type de dispositif amène une solution rapide en efficacité, mais avec des coûts d'entretien élevés (curage). De plus, ceux-ci sont dimensionnés pour une pluie d'une période de retour donnée, qui peut être dépassée lors d'un événement exceptionnel ou suite à plusieurs   v  nements pluvieux qui se répètent dans des délais très courts (Le Bissonnais *et al.*, 2002)

4.2.2. Les fossés

Les fossés permettent de rediriger les écoulements vers des zones moins vulnérables (Figure 16). Si ceux-ci sont enherbés ou à redents, ils peuvent infiltrer une partie de l'eau et ainsi diminuer les quantités d'eau à l'exutoire. Cependant, ils peuvent accélérer le ruissellement. Tout comme les bassins de rétention, les fossés doivent être régulièrement curés et ce sont des ouvrages infranchissables pour les machines agricoles (Le Bissonnais *et al.*, 2002).



Figure 16. Fossé enherbé (   gauche) et un fossé    redent (   droite) (source : Irstea)

4.3. Résultats du stage précédent de Benoit Friconnet

Le stage réalisé en 2016 par Benoit Friconnet dans le cadre du programme Gerihco a permis de caractériser les types de dispositifs selon leur capacité à réduire la vitesse de l'écoulement, la capacité d'infiltration et de rétention des sédiments (Tableau 1).

L'efficacité des différents dispositifs sur les réductions de vitesse d'eau et sur l'infiltration de l'eau par l'ouvrage est fonction de l'écoulement entrant. Pour un faible écoulement entrant, les bandes de miscanthus, tout comme les fascines, réduisent la vitesse de l'eau. Cependant, celles-ci ont très peu d'influence sur la capacité à infiltrer l'écoulement. Pour un écoulement entrant plus fort, la bande enherbée, qui avait une fonction infiltrante pour des flux plus faibles, n'est plus optimale pour infiltrer les flux d'eau. Il faut dès lors privilégier les bandes de miscanthus.

L'efficacité de ces dispositifs est aussi fonction de la couverture végétale auxiliaire présente au pied des ouvrages. Les résidus en surface des haies et des bandes de miscanthus ralentissent les flux d'eau. Outre les résidus des végétaux, la densité de tiges au pied est importante pour ralentir les flux entrants.

Concernant l'efficacité pour retenir les sédiments, les fascines sont les dispositifs les plus performants, suivies par les bandes de miscanthus, contrairement aux haies et aux bandes enherbées qui ont une efficacité réduite.

Un paramètre qui peut également être pris en compte lors de l'aménagement est l'autorégénération de l'ouvrage. Si l'ouvrage est autorégénératif, celui-ci peut être plus durable dans le temps.

Tableau 1. Synthèse des capacités des ouvrages d'hydraulique douce (Friconnet, 2016)

Type de dispositif	Largeur typique (m)	Capacité de rétention des sédiments instantanée	Autorégénération (durabilité sans curage)	Faible écoulement entrant		Fort écoulement entrant	
				réduction de la vitesse de l'eau	infiltration dans le dispositif	réduction de la vitesse de l'eau	infiltration dans le dispositif
Bande enherbée	10 m	3	3	3	4	2	2
Bande de Miscanthus	5 m	4	4	5	4	4	3
Haie arbustive	1 m	2	4	4	3	3	2
Fascine morte	0.8 m	5	1	5	1	5	1

Légende

1	très faible	...	5	très fort
---	-------------	-----	---	-----------

4.4. Stratégies de localisation des ouvrages

4.4.1. Localisation des ouvrages

Selon les ouvrages, le choix de la localisation diffère. Par exemple, les fascines sont placées le long des cours d'eau, des routes, à proximité de zones d'habitat (Ouvry *et al.*, 2012). De plus, leur localisation au sein des parcelles agricoles est rare et elles prennent donc place le long des parcelles agricoles pour empiéter le moins possible sur les zones de culture. L'efficacité des fascines augmente lorsque les surfaces ruisselantes situées en amont de l'ouvrage sont de petites dimensions. Les fascines placées plus en aval ont un impact plus grand sur les réductions en sédiments et les débits d'eau à l'exutoire. Les fascines placées plus en amont ont une efficacité plus localisée. Lorsque les fascines sont mises en place en série sur le chemin d'eau, la distance entre deux fascines est d'une grande importance. En

effet, si la distance est grande et si le type de sol en aval de la fascine est sensible à l'érosion, on peut observer le phénomène de reprise d'érosion par l'eau de ruissellement que la fascine laisse passer (Dumas, 2009). À la sortie de la fascine, cette eau porte moins de sédiments que sa capacité de transport, et par conséquent elle va pouvoir détacher des particules de terre en aval de la fascine. Dans ce cas, l'effet de la fascine à l'exutoire principal du bassin versant peut devenir négligeable. La mise en place des fascines en série peut diminuer la reprise d'érosion avant l'arrivée des flux à l'exutoire.

La localisation des haies arbustive est souvent restreinte aux bords des champs (Richet *et al.*, 2016).

A contrario, les haies herbacées peuvent également être positionnées en travers d'un talweg où le ruissellement sera dès lors plus concentré (Richet *et al.*, 2014). Elles sont également placées perpendiculairement à la pente pour lutter contre le ruissellement diffus. L'étude de Richet *et al.* (2014) a mis en avant la localisation à privilégier pour ces haies herbacées. Celles-ci, tout comme les fascines, ont une efficacité plus importante lorsqu'elles sont placées près des sources d'érosion.

Afin de maximiser l'efficacité des bandes enherbées, celles-ci sont positionnées préférentiellement dans les tournières en aval des parcelles, le long des versants en forte pente, dans les axes de talwegs et en angle de parcelles. On peut également utiliser la bande enherbée pour diviser de grandes parcelles afin de couper la pente et de réduire les volumes et vitesses de l'eau (Soltner, 2001). Pour les bassins versants soumis à de l'érosion diffuse, la bande enherbée en bas de parcelle sert de zone de rétention. Lorsque l'écoulement est concentré, le chenal enherbé de talweg est la solution la plus efficace (Ouvry *et al.*, 2012), notamment pour éviter la formation des rigoles et des ravines. De plus, les bandes enherbées sont généralement placées en bas d'un champ cultivé ou d'une prairie pâturée pour limiter l'exportation de nutriments et de polluants vers les cours d'eau.

4.4.2. Densité d'ouvrages sur un bassin versant

L'efficacité de l'aménagement d'un bassin versant dépend non seulement de la localisation des ouvrages à des endroits stratégiques, mais également de la densité de linéaire d'ouvrages d'hydraulique douce. Pour avoir une idée des densités employées actuellement dans des bassins versants aménagés et une appréciation de l'effort d'action correspondant, nous avons collecté des données auprès de gestionnaires de divers territoires en France et en Belgique.

En Alsace, la chambre d'Agriculture a aménagé en fascines plus ou moins fortement de nombreux bassins versants. Des données concernant la densité de linéaire de fascine sur un bassin versant ont été récoltées (Tableau 2).

Tableau 2. Densité de fascines et appréciation de l'intensité d'aménagement du bassin versant (C. Cugnière et R. Michael, communication personnelle 2017)

Commune	Superficie du bassin versant [ha]	Densité de linéaire [m/ha]	Appréciation de l'intensité
Ettendorf	194	8,1	Forte
Soultz-sous-foret	50	12,4	Forte
Romanswiller	134	2,1	Faible
Gougenheim	132	2,0	Faible
Pfaffenhoffen	99	4,4	Moyenne
Hohatzenheim	35	6,0	Moyenne

Ces informations montrent que l'efficacité d'action est jugée faible autour de 2 m linéaire de fascine par hectare, moyenne au-dessus de 4 ml/ha et forte à partir de 8 ml/ha

En Belgique, Karel Vandaele (communication personnelle, 2017) a répertorié les aménagements en dispositifs enherbés (Tableau 3). Les bandes enherbées sont soit disposées perpendiculairement à l'écoulement, soit dans le talweg. D'autres ouvrages, comme les bassins de rétention, les chenaux enherbés, sont également présents sur les bassins versants. Les bandes enherbées perpendiculairement à la pente suivent généralement le bas d'une ou plusieurs parcelles entières. Par conséquent, la densité dans les bassins versants peut atteindre des valeurs nettement plus fortes que celles des fascines qui sont des structures plus localisées. L'exemple de la commune « De Heide » montre qu'une action d'intensité moyenne est obtenue avec environ 9 ml/ha de bandes enherbées.

Tableau 3. Densité de bandes enherbées et appréciation de l'intensité d'aménagement du bassin versant

Commune	Superficie du bassin versant [ha]	Densité de linéaire de bandes enherbées (perpendiculaires au sens d'écoulement) [m/ha]	Densité de linéaire de bandes enherbées (talweg) [m/ha]	Autres dispositifs présents	Appréciation de l'intensité
Heulen Gracht	300	6.96	3.8	3 barrages en terre et un bassin de rétention	Forte
Kattesteeg	37	63.7	4.7	Bassin de rétention	Forte
De heide	218	8.8	1.7	Bassin de rétention	Moyenne
Jonker janlaan	212	5.8	0	Un barrage en terre et un bassin de rétention	Faible
Rumsdorp	49	0	11.2	Un barrage en terre	Suffisante
Spikboomstraat	150	10	0	3 bassins et rétention et 3 chenaux enherbés	Forte

4.4.3. Aménagement de bassin versant

A l'heure actuelle, le choix du dispositif et de sa localisation dans les bassins versants du Bas-Rhin se fait sur base de considérations pratiques et dépend fortement de l'attitude des parties prenantes. Lors du diagnostic du territoire, les chemins d'eau sont identifiés. La localisation de ces ouvrages se fait sur ces chemins d'eau, mais il n'existe pas encore de trame méthodologique permettant d'accorder le type d'ouvrage le plus adapté au type de flux et à la topographie du lieu. Le choix du type de dispositif est souvent fonction de ce qu'accepte l'agriculteur. Des considérations à l'échelle du bassin versant sont difficiles pour optimiser le résultat à l'exutoire en l'absence d'outils d'évaluation spatialisés et adaptés à la prise en compte des effets hydrauliques et hydrologiques des dispositifs d'hydraulique douce. Cette étude essaie de fournir des éléments de réponse à la question du choix des types, de la densité et de la localisation des dispositifs à l'échelle du bassin versant.

5. Méthodologie

L'ensemble des étapes de la méthodologie est repris en Figure 17.

Tout d'abord, les paramètres hydrauliques et hydrologiques (coefficient de Manning et conductivité hydraulique à saturation, K_{sat}) pour chaque ouvrage testé seront présentés. Ceux-ci reposent sur des études faites par l'AREAS et le stage de master 2 de Benoît Friconet en 2016 à l'ARAA.

Ensuite, le choix des scénarios sera exposé et tiendra compte non seulement des types d'écoulement, de la topographie locale et des dispositifs d'hydraulique douce (bande enherbée, bande de miscanthus, fascine et haie), mais également des contraintes de terrain et des agriculteurs.

Le logiciel de simulation utilisé est openLISEM qui est un modèle hydrologique à base physique. Il permet de simuler de façon spatio-dynamique le ruissellement, l'érosion et les flux d'eau et de sédiments sortant d'un bassin versant, soumis à un événement pluvieux. Pour cela, il est nécessaire d'avoir des cartes d'entrée de base comme un modèle numérique de terrain (MNT), une carte des sols, l'occupation du sol et un fichier de précipitations. De ces cartes de base, grâce à un script dans le « Dynamic Modelling language » de PCRaster (Wesseling *et al.*, 1996) et des tableaux de correspondance, des cartes dérivées vont être créées. Celles-ci seront les entrées du logiciel openLISEM. Les ouvrages d'hydraulique douce sont également modélisés dans l'interface d'openLISEM et sont soit considérés comme de l'occupation du sol (bandes enherbées et de miscanthus), soit comme piège à sédiments dans le cas des fascines ou comme « grass strips » pour les haies (en adaptant les paramètres pertinents). Les sorties du modèle sont des cartes de dépôts et de détachement, d'infiltration, de ruissellement, ainsi que des hydrogrammes et sédigrammes pour des points d'exutoires au choix.

Pour évaluer l'efficacité des scénarios, les pourcentages de réductions de perte en terre, de débit de pointe et de volume d'eau sont utilisés.

Enfin, sur base des résultats, un outil d'aide à la décision pour le placement d'ouvrages d'hydraulique douce dans un bassin versant est proposé en tenant compte des caractéristiques des bassins versants et des dispositifs. Cet outil permet de construire un scénario supplémentaire qui combine différents types de dispositifs en les plaçant à des endroits adaptés pour chaque bassin versant. Ces scénarios sont optimisés pour réduire les pertes en terre et le débit de pointe à l'exutoire du bassin versant.

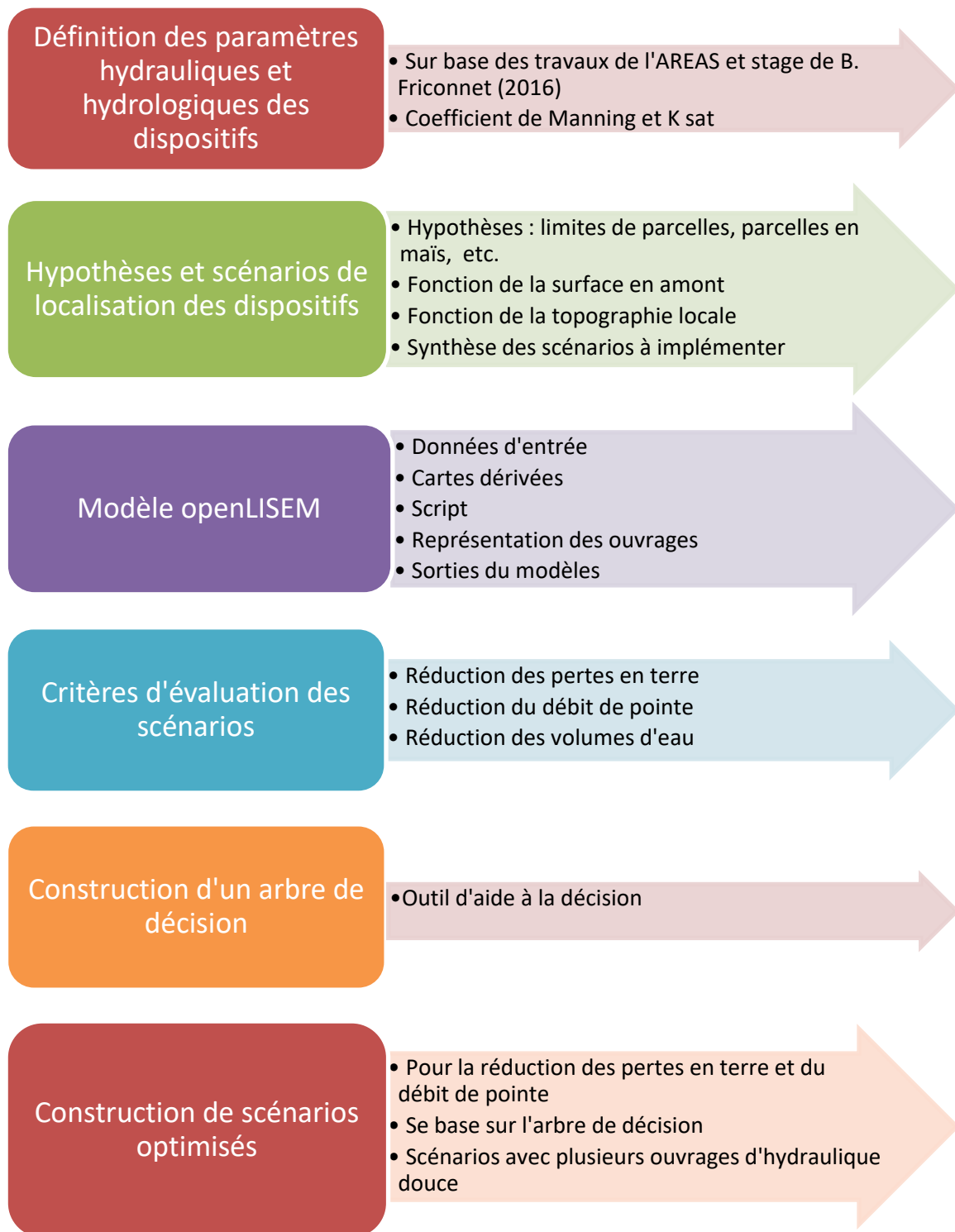


Figure 17. Etapes principales de la méthodologie

5.1. Définitions des paramètres hydrauliques et hydrologiques des dispositifs

Sur base de la littérature (Ouvry *et al.*, 2012 ; Richet *et al.*, 2014) ainsi que des résultats obtenus par le stage de B. Friconnet (2016), différents scénarios ont été élaborés afin de mettre en évidence des stratégies génériques d'aménagement de bassin versant. Ces scénarios tiennent compte de la variabilité du type d'ouvrage, de leur dimension, ainsi que du type d'écoulement entrant pouvant être rencontré. Deux bassins versants ont été choisis pour effectuer les différentes simulations de scénarios. Ceux-ci sont des bassins versants présentant des problématiques de coulée d'eau boueuse. Une description plus précise de ces bassins versants est faite au chapitre 6.

Les différents ouvrages d'hydraulique douce qui seront modélisés par la suite sont : les bandes enherbées, les bandes de miscanthus, les haies et les fascines mortes. Ces types de dispositifs sont connus et utilisés sur certains bassins versants alsaciens. Ce sont ces ouvrages qui ont été caractérisés par Friconnet (2016) dans l'étude préparatoire à ce travail (Tableau 4). Les résultats concernant les fascines mortes s'appliquent aussi aux fascines vivantes qui ont approximativement le même comportement hydraulique.

Dans cette étude, les paramètres ont été déterminés selon l'âge des ouvrages pour montrer leur potentiel d'efficacité maximal. Ainsi, la fascine morte est efficace dès sa mise en place. La bande enherbée est bien développée dès la deuxième année après son implantation. La bande de miscanthus prend au minimum 3 ans pour se développer (Gauthier *et al.*, 2013). Tandis que la haie montre une efficacité à partir de sa 5^{ème} année d'implémentation.

Tableau 4. Synthèse des paramètres utilisés pour les ouvrages d'hydraulique douce

		Bande enherbée (>2 ans)	Bande de miscanthus (> 3 ans)	Haie (>5ans)	Fascine morte
Coefficient Manning (n) [s/m ^{1/3}]	Diffus	0,43	1,3	0,25	2
	Concentré	0,135	0,6	0,35	2
K sat [mm/h]		90	70	400	35

5.2. Hypothèses sur les scénarios de localisation des dispositifs

Les ouvrages d'hydraulique douce sont disposés en différents endroits dans le bassin versant afin d'évaluer leur efficacité et de trouver la position la plus optimale. Dans un premier temps, chaque type d'ouvrage est testé indépendamment des autres.

La position des ouvrages dépend du flux entrant dans l'ouvrage. Pour caractériser ce flux, la surface drainée en amont est utilisée comme proxy de la nature du flux rencontré. Dans ce travail, lorsque la surface drainée en amont est inférieure à 5 ha, les flux d'eau sont dits **diffus**. Au-delà de 5 ha et jusque 40 ha, les flux sont dits **concentrés**. La limite de 40 ha a été choisie en tenant compte de la performance des dispositifs d'hydraulique douce. On considère que l'hydraulique douce n'est pas capable de gérer les flux au-delà de cette limite, sauf si les ouvrages sont placés en série (Syndicat mixte des bassins versants de la Pointe de Caux, 2017 ; Ouvry, 2015)

Le choix de la localisation des ouvrages dépend également de la topographie du lieu. En effet, les fascines sont des ouvrages efficaces lorsqu'un talweg est présent. Elles doivent donc être positionnées

perpendiculairement à l'axe de celui-ci. La longueur des fascines est déterminée selon l'encaissement du talweg. Arbitrairement et par expérience, une hauteur de 40 cm entre le point le plus bas de la fascine et le haut de celle-ci doit être atteinte. La Figure 18 montre que selon l'encaissement du talweg (vert), la longueur de la fascine (entre les deux points noirs) est variable (J.B. Staquet, communication personnelle, 2017). Plus le talweg est marqué, plus la fascine sera courte. Ceci montre aussi qu'en cas de topographie trop plane, la fascine devient très longue et n'est plus pertinente.

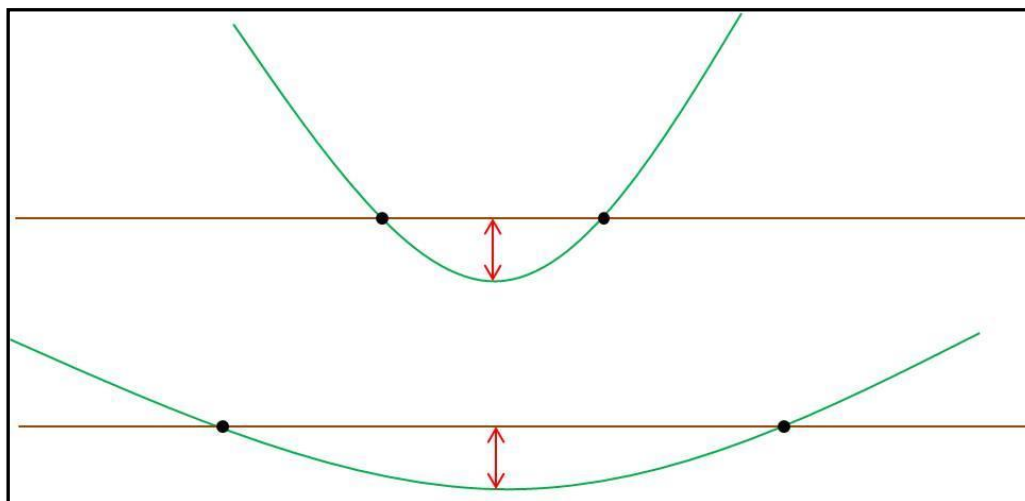


Figure 18. Calcul de longueur de la fascine (J.B. Staquet)

Ces ouvrages sont testés avec plusieurs largeurs pour évaluer si celle-ci a une influence selon le type d'écoulement rencontré. Pour les fascines, lorsque la topographie n'est pas propice, elles sont remplacées par une bande enherbée (de largeur variable). Les bandes enherbées (BE) et de miscanthus ont une largeur de 5 ou 10 mètres. Ces largeurs ont été choisies en relation avec la résolution des cartes de départ qui est de 5 mètres. Concernant les haies, celles-ci sont soit composées de 3 ou de 6 rangs, ce qui correspond à une largeur de 0,8 m et 1,6m (Tableau 5). OpenLISEM permet de les prendre en compte comme des objets intracellulaire, c'est-à-dire que leurs caractéristiques sont appliquées à une fraction de chaque cellule concernée et non pas à la cellule entière.

Tableau 5. Synthèse des scénarios à simuler

		Flux diffus/ flux concentré			
		Bande enherbée	Bande de miscanthus	Fascine en association BE	Haie
Dimension de l'ouvrage	« Modérée »	5m	5m	Fascine + BE de 5m	3 lignes = 0.8 m
	« Renforcée »	10m	10m	Fascine + BE de 10m	6 lignes = 1.6 m

Plusieurs hypothèses ont été posées pour ces scénarios. Tout d'abord, les ouvrages sont placés uniquement sur les limites de parcelles, afin que les agriculteurs soient le moins dérangés par ces mesures. Deuxièmement, l'ensemble des scénarios proposés sont testés avec l'ensemble des parcelles agricoles en maïs (cas le plus défavorable) pour éviter de positionner des ouvrages selon les sources d'érosion plus importantes. En effet, chaque année, en raison des rotations culturales, les parcelles sont emblavées en différentes cultures. Une parcelle qui est en blé une année, présentant peu d'érosion, peut devenir une source d'érosion l'année suivante lorsqu'elle sera en maïs. Toutefois, les

parcelles en forêt, en prairie permanente, les vergers et le bâti sont laissées à l'identique, car non amenées à être modifiées dans les années suivantes.

En plus des propositions d'aménagement par des ouvrages d'hydraulique douce, des scénarios jouant sur l'occupation du sol et sur la gestion des fossés permettront d'élargir le champ de vision et de mettre en évidence des pistes de réflexion plus globale à mener lors d'un aménagement d'un bassin versant sujet à des problèmes de coulées d'eau boueuse.

5.3. Modélisation de l'érosion par le modèle openLISEM

5.3.1. Généralités

Le modèle openLISEM (Limburg Soil Erosion Model) est un modèle hydrologique   v  nementiel à base physique. Il permet de simuler le ruissellement et l'érosion de façon spatio-dynamique. Ce logiciel intègre de nombreux processus qui interviennent dans les phénomènes d'érosion : interception, infiltration, stockage dans les microd  pressions, ruissellement, détachement des particules par effet *splash*, le transport et dépôts des particules de sol (Figure 19). De plus, ce modèle peut prendre en compte l'influence des roues des tracteurs, les petits chemins et l'imperméabilisation de la surface.

L'avantage principal de ce modèle est d'intégrer un système d'informations géographiques (SIG). Le modèle utilise une grille de cellules dont la résolution est fixée par l'utilisateur. L'ensemble des processus sont résolus pour chaque cellule. De ce fait, les sorties du modèle sont sous format raster.

Etant donnée l'échelle temporelle du modèle, à savoir l'événement pluvieux, le modèle ne simule pas les processus d'évaporation, de changements de végétation et les processus en lien avec la nappe phréatique. Ce modèle est utilisé pour des tailles de bassins versants variables. Plus la taille du bassin versant augmente, plus la taille des cellules sera importante. Toutefois, celle-ci ne devra pas excéder 50 mètres (Jetten *et al.*, 2017).

Les raisons du développement du modèle openLISEM sont les suivantes :

- Amélioration des descriptions d'infiltration de l'eau et du détachement des particules ;
- Intégration d'un SIG ;
- Autorisation d'entrées issues de la télédétection.

L'utilité d'intégrer un SIG provient de la spatialis  tion des processus d'érosion et de ruissellement. En associant un SIG au modèle, la discrétisation en fonction de la taille des cellules doit permettre de mieux prendre en compte la variabilité spatiale (De Roo *et al.*, 1996a).

Dans ce modèle de simulation, la conductivité hydraulique est la variable la plus sensible. Il a aussi été démontré par De Roo *et al.* (1996b) que le gradient de pente et la rugosité aléatoire sont des variables importantes. Les variables les plus importantes qui influent directement les sorties de sédiments et qui sont modifiées par l'hydraulique douce sont la conductivité hydraulique et le coefficient de Manning (n).

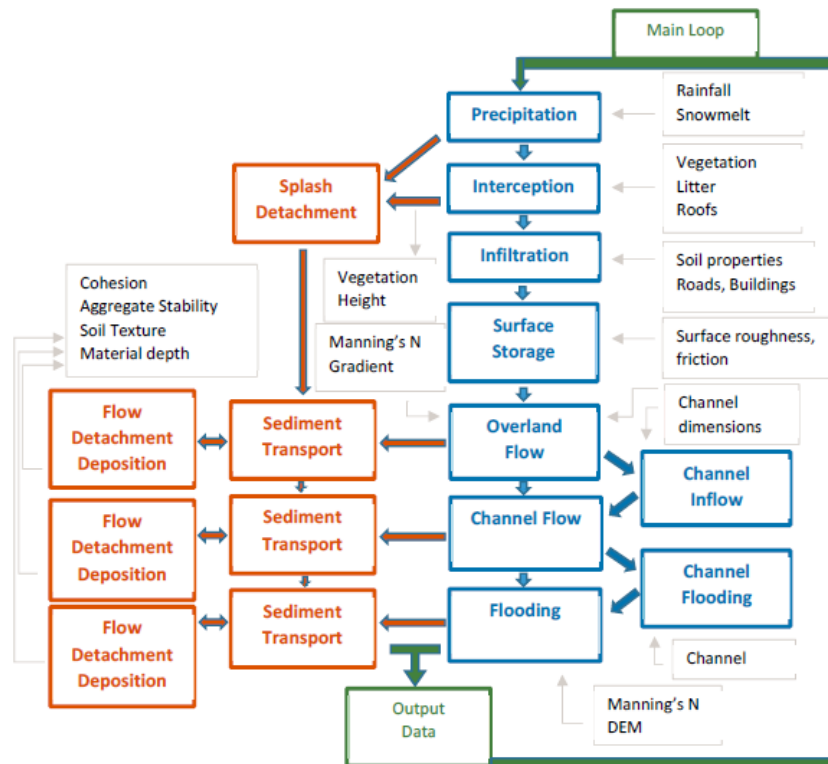


Figure 19. Organigramme du modèle openLISEM. En rouge, les processus liés aux sédiments. En bleu, ceux liés à l'hydrologie. Les données nécessaires pour chaque processus sont reprises en gris (Jetten *et al.*, 2017)

5.3.2. Données d'entrée

Le modèle openLISEM permet de diviser la cellule en plusieurs sous cellules. Les données de base peuvent représenter uniquement une fraction de la cellule.

5.3.2.1. MNT

Le MNT permet de définir la topographie sur l'ensemble du bassin versant étudié. La résolution du MNT définit sa précision. Ce MNT peut être obtenu grâce à la technologie LIDAR (Light Detection and Ranging) qui repose sur la technique de mesure d'une distance grâce à un émetteur laser. La résolution XY des images LIDAR peut être très élevée et est souvent de 0.5 m.

Pour l'utilisation dans openLISEM, la résolution du MNT a d   être dégradée pour atteindre une résolution de 5 mètres. La principale raison de cette dégradation est la diminution du temps de calcul par la suite, tout en gardant une précision suffisante pour la bonne simulation des chemins d'eau (Jacod, 2008). Cette manipulation de r  -échantillonnage a été faite sur Arcgis (version 9.2).

5.3.2.2. Carte des sols

Les sols ont une grande importance dans les processus qui conditionnent l'érosion, notamment le ruissellement et l'infiltration. La carte des sols utilisée est une carte des sols de l'Alsace digitalisée à l'échelle 1/100 000  . Pour la suite des simulations, les numéros des unités cartographiques des sols (UCS) de cette carte sont utilisés auxquels sont associés des types de sols et des caractéristiques physiques de ces sols tels que la texture, les teneurs en éléments grossiers, en matière organique et en calcaire.

5.3.2.3. Carte de l'occupation du sol

La carte de l'occupation des sols conditionne également les processus d'érosion et notamment les zones de détachement et de dépôts. Elles fournissent les limites des parcelles sur lesquelles des ouvrages d'hydrauliques douces peuvent être positionnés. Les îlots issus du registre parcellaire graphique (îlots RPG) reprennent l'identification des parcelles agricoles et des cultures qui y sont implantées. Les îlots sont déclarés chaque année et leur localisation se fait à une échelle 1/5000^e. En ce qui concerne les cultures mises en place à l'année, une campagne de terrain doit être menée.

Sur base du *shapefile* des îlots RPG, l'ensemble des parcelles sont digitalisées. Il est nécessaire que toutes les parcelles soient jointives. Dans une même parcelle, plusieurs cultures peuvent être présentes. Chaque parcelle est codée selon un numéro d'identification et d'un code correspondant à l'occupation du sol et de son itinéraire technique (Annexe I).

Les routes et chemins font partie de l'occupation du sol, mais sont stockés dans une carte qui leur est propre, tout comme les fossés.

5.3.2.4. Précipitations

Les données de pluviomètres présents sur le bassin versant sont entrées à un pas de temps déterminé et chaque pixel est relié à un pluviomètre. Le modèle génère ensuite une carte de distribution spatiale d'intensité des pluies au cours du temps (De Roo *et al.*, 1996a). La pluie utilisée est une pluie d'orage en Alsace qui induit des coulées d'eau boueuse avec 35mm en 30 minutes sans différenciation spatiale.

5.3.3. Cartes dérivées

5.3.3.1. Cartes dérivées du MNT

Sur base du MNT, on peut déduire plusieurs cartes. Tout d'abord, on peut calculer la carte des pentes (*grad.map*) et la direction des écoulements, *local drainage direction* (*ldd.map*). En choisissant un exutoire (*outlet.map*), grâce au LDD, on peut déterminer les limites du bassin versant (*mask.map*) et calculer les chemins d'écoulement de l'eau (*accu.map*) (Figure 20).



Figure 20. Carte des directions des flux (*ldd.map*), à gauche et carte d'accumulation des flux, *accu.map* (à droite)

5.3.3.2. Cartes dérivées de la carte d'occupation du sol

Cartes de végétation

Pour chaque culture, les fractions couvertes par la végétation et les résidus de la culture sont calculées (per.map). La hauteur de la végétation (ch.map) ainsi que son indice foliaire (LAI, leaf area index) sont calculés. Grâce au LAI (lai.map), l'interception de la culture peut être calculée. La capacité de stockage maximale est calculée grâce à l'équation de Von Hoyningen-Huene (1981) (De Roo *et al.*, 1996a).

Cartes de la surface du sol

Pour mesurer le microrelief, la rugosité aléatoire, *random roughness*, (rr.map) est utilisée. La capacité de stockage dépend donc de cette rugosité, mais également de la pente du versant (De Roo *et al.*, 1996a). Le microrelief permet le stockage de l'eau dans de microdépressions, mais également de ralentir les flux d'eau.

Le coefficient de Manning (n.map) est utilisé pour caractériser la résistance à l'écoulement. Ce coefficient dépend du type de végétation présent sur la parcelle agricole, de la fraction des résidus et du couvert de la végétation, de la rugosité aléatoire et d'un paramètre structural de culture selon la nature de l'écoulement (Lefrancq *et al.*, 2016 ; cf. 5.3.5.1)

On peut également déduire une carte des zones non érodibles sur base de la carte d'occupation du sol. Ces surfaces seront appelées « hard surface » (hardsurf.map). Les surfaces non érodibles sont notamment les surfaces bâties et les routes.

Cartes d'érosion

Le taux de dépôts en sédiments dépend de la largeur de l'écoulement, de sa vitesse, de la capacité de transport et de la concentration en sédiment de l'écoulement. La cohésion des particules de sol (coh.map) à saturation intervient aussi dans le calcul (De Roo *et al.*, 1996a). En plus de la cohésion des particules de sol, la cohésion liée aux racines des plantes doit y être ajoutée (cohadd.map). Un autre paramètre sensible pour l'érosion est la stabilité des agrégats sous l'effet *splash* (aggrstab.map).

5.3.3.3. Cartes dérivées de la carte des sols

Infiltration et transport de l'eau dans le sol

Plusieurs modèles d'infiltration peuvent être utilisés dans openLISEM : modèle de Smith et Parlange, modèle SWATRE et le modèle de Green et Ampt.

SWATRE (soil water balance for terrestrial ecosystems) est un modèle d'infiltration et de transport d'eau dans le sol qui repose sur l'équation de Richards (combinaison entre l'équation de Darcy et l'équation de continuité). Pour utiliser cette méthode, il est nécessaire d'utiliser une carte des sols avec des classes de sols et leur potentiel d'infiltrabilité associé, le tout dans les 3 dimensions (University of Twente).

Le modèle de Smith et Parlange et le modèle de Green et Ampt utilisent une simplification de l'équation de Darcy pour l'écoulement vertical. Dans cette étude, le modèle de Green et Ampt a été utilisé :

$$f = -K_s * (1 + \psi * (\theta_s - \theta_i) / F)$$

Où :

f est le taux d'infiltration (mm/h)

K_s est la conductivité hydraulique à saturation (mm/h)

ψ est la succion au front d'humectation (mm)

θ_s est la porosité (-)

θ_i est la teneur en eau initiale (-)

F est l'infiltration cumulée (mm)

5.3.4. Equations de modélisation d'écoulement en surface

OpenLISEM permet de choisir entre deux modèles d'écoulement de ruissellement en surface : l'onde cinématique (1D) et l'onde diffuse (2D).

5.3.4.1. Ecoulement de surface en 1D : l'onde cinématique

L'écoulement de surface suit une équation d'onde cinématique en une dimension. Il suit le *ldd*, issu du modèle numérique de terrain. Chaque cellule transfert l'écoulement à une cellule voisine, selon la plus grande pente. Une cellule transfert tout son écoulement à une seule cellule (Figure 21). Le réseau est continu et se finit par un exutoire unique pour chaque bassin versant. On peut observer des microd  pressions, qui seront « remplies » pour permettre la continuité de l'écoulement.

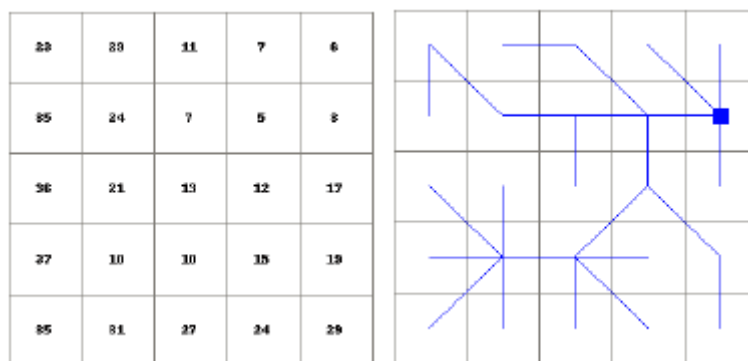


Figure 21. Modèle numérique de terrain (gauche) et *ldd* associé (droite)

Le principal inconvénient de cette méthode est le fait que les hauteurs d'eau de ruissellement sont fonction de la résolution choisie ; par conséquent l'hydraulique des écoulements et son érosivité sont également fonction de cette résolution et influencent l'érosion simulée. Le comportement de la convergence vers des cellules uniques vers l'aval crée des hauteurs d'eau et des débits surestimés notamment pour les grands bassins versants et/ou en cas des mailles trop petites. Une autre difficulté est le fait que les cellules ne peuvent pas déborder et générer des zones inondées. Les situations dans lesquelles l'eau stagne derrière un obstacle à forte résistance hydraulique ne sont alors pas correctement simulables avec l'onde cinématique.

Toutefois, la solution utilisant l'équation cinématique est moins sensible à la discrétisation du pas de temps (Jetten *et al.*, 2017).

5.3.4.2. Ecoulement en 2D : l'onde diffuse

L'écoulement en deux dimensions est discr  t  s   dans le temps et dans l'espace. La solution a la forme d'une onde diffuse. Pour chaque cellule, l'écoulement sortant est la somme des flux entrants venant des cellules adjacentes. L'onde diffuse permet aux cellules de déborder et de générer des zones inondables. Les flux sont alors plus dispersés et les hauteurs d'eau engendrées, plus faibles. Cette modélisation est plus proche de ce que l'on peut observer sur le terrain. Cependant, d'après Victor Jetten (communication personnelle, 2017), ce modèle est encore perfectible, car les vitesses d'écoulement et les taux d'érosion générés sont trop faibles par rapport à la réalité de terrain.

La résolution en 2D ne tient pas compte de la conservation du moment contrairement à la résolution de l'onde complètement dynamique.

5.3.5. Script, options et paramétrages

Les différents *shapefiles* des cartes d'entrée sont rast  ris  s à la résolution de 5 mètres et aux dimensions de chaque sous bassin versant. Ensuite, les rasters sont transformés en fichier *ascii* pour pouvoir être importés dans le format PCRaster (.map) qu'utilise openLISEM. La conversion se fait avec la commande *asc2map*.

PCRaster a été également utilisé pour générer l'ensemble des cartes dérivées des cartes de base, à l'aide d'un script (Annexe II). Celui-ci nécessite des tableaux de correspondance, reprenant les paramètres liés aux cultures et au sol. L'ensemble des paramètres est uniquement valable pour le mois de mai en Alsace.

5.3.5.1. Paramètres d'occupation du sol

Un grand nombre de paramètres interviennent dans les processus d'érosion (Annexe I). Citons tout d'abord, la stabilité des agrégats. Celle-ci est fonction du type de travail du sol. La pratique de labour fragilise la stabilité structurale des sols et notamment des sols limoneux. Ceci est d   à la dilution des matières organiques sur la profondeur de labour et à l'augmentation de la minéralisation de ces matières organiques. De plus, le labour perturbe la vie biologique. Ces deux impacts diminuent la stabilité des agrégats à la surface et rendent le sol plus sensible à l'érosion. Des valeurs de stabilité des agrégats sont observées pour des techniques de travail du sol comme le non-labour ou le semis direct. Lorsque les occupations du sol ne sont pas concernées par la présence de mottes de terre à la surface (prairies, forêt avec litière, surfaces artificielles), la valeur -1 a été attribuée.

Le deuxième paramètre est la hauteur moyenne des plantes (m). Elle a été mesurée en mai pour chaque culture.

Ensuite, la cohésion de la surface du sol a été déterminée. Plus le sol est travaillé, plus cette cohésion diminue. Pour les surfaces anthropisées (routes et surfaces bâties), la cohésion est très élevée. De plus, une cohésion additionnelle liée aux racines est calculée. Plus les racines sont développées et denses, plus cette cohésion augmente.

Le paramètre suivant est l'indice de surface foliaire (LAI, *leaf area index*) qui représente la surface foliaire d'une culture par unité de surface au sol. En mai, le maïs n'est pas encore développé et son indice de surface foliaire est nul.

La fraction de la surface couverte par les résidus et par la végétation a été mesurée sur le terrain. En prenant un rectangle de 60x40 cm et en le posant aléatoirement dans le champ (Figure 22). Ensuite, les pourcentages ont été estimés grâce au diagramme présent en Annexe III.



Figure 22. Mesure de la fraction du sol couverte par les résidus et la végétation (© H.Leduc)

La rugosité aléatoire (mm) a été mesurée grâce à la méthode de la chaînette. La chaînette est apposée sur la surface du sol et sa longueur totale est mesurée. Plus la surface est rugueuse, plus le rapport entre la longueur mesurée et la longueur de la chaînette est faible et plus la rugosité aléatoire calculée est élevée. Masson (2011) a trouvé que :

$$Rugosité\ aléatoire\ [mm] = \left(1 - \frac{longueur\ mesurée[cm]}{longueur\ de\ la\ chaînette[cm]} \right) * 100$$

Le calcul du coefficient de Manning est une modification de la méthode proposée par Phillips (1989) où le coefficient de Manning est fonction du degré d'irrégularité de la surface, de l'obstruction, de la couverture de la végétation et des caractéristiques de la végétation, notamment la hauteur. Lefrancq *et al.* (2016) a proposé une méthode pour estimer le coefficient de Manning (n) :

$$n = n_{soil} + n_{residue} + cover * n_{veg}$$

Celui-ci est fonction du coefficient de Manning du sol, approximé comme étant $1/10^{\circ}$ de la rugosité aléatoire. Le Manning lié aux résidus est égal à 0,01 lorsque le pourcentage des résidus est inférieur à 5%. Le coefficient de Manning lié à la végétation est égal à $0,127 * crop\ parameter^5$. Par exemple, n_{veg} pour le blé est de 0,6 ; pour la betterave, il est de 0,3 et pour le maïs de 0,15.

De plus, le coefficient de Manning a été modifié par un paramètre qui permet de tenir compte de la nature de l'écoulement. En effet, lorsque l'écoulement est important et devient plus concentré dans un talweg, par exemple, la végétation présente ne freine pas autant l'écoulement. Sa résistance diminue lorsque les hauteurs d'eau augmentent. C'est pourquoi le coefficient de Manning est plus élevé dans le cas où les flux sont dits diffus et plus faible lorsque les écoulements sont plus concentrés.

5.3.5.2. Paramètres du sol

Teneur en eau

L'ensemble des paramètres des sols sont issus de la base de données des sols d'Alsace. Chaque sol a été caractérisé par sa conductivité à saturation, par le pourcentage d'éléments grossiers qu'il contient, par sa teneur en eau à saturation et par le diamètre moyen des particules de sol (d50) (Annexe IV).

Pour la teneur en eau initiale (θ_i), celle-ci a été choisie en fonction de l'état du sol en mai. Ce paramètre est fort variable en fonction des conditions climatiques. Il a été fixé à 0,2 ce qui correspond à un sol moyennement humide.

⁵ Paramètre de culture

Succion au front d'humectation

Un autre paramètre est le paramètre ψ (cm), la succion au front d'humectation, qui détermine la capacité du sol à infiltrer l'eau par capillarité. Il montre la force de succion qu'exerce le sol sur l'eau. Plus la valeur de ψ est faible, moins sera la force de succion. Pour les sols limoneux, la gamme de valeurs est de 5 à 30 cm (Rawls *et al.*, 1989). Dans ce travail, ψ a été estimé avec des fonctions de pédotransfert et égale environ 17 cm.

L'influence de ψ sur les sorties du modèle sera étudiée dans la suite de ce rapport (chapitre 7.1.2).

Conductivité hydraulique

Le sol suit le modèle de Green et Ampt en deux couches. Pour les terres arables, la première couche d'environ 7 cm d'épaisseur correspond à la couche concernée par la préparation d'un lit de semence (passage d'un vibroculteur ou d'une herse) et ses caractéristiques structurales sont fortement dynamiques au cours de l'année. Pour la couche en-dessous, les caractéristiques sont moins variables dans le temps. Pour les autres cas (cultures non labourées et sols non cultivés), la première couche de sol représente environ 40 cm. La profondeur totale de sol est fixée arbitrairement à 1,5m.

La reprise en masse du sol travaillé sous l'influence des précipitations cumulées diminue la porosité et entraine une modification de la conductivité hydraulique à saturation. De plus, les précipitations peuvent conduire à la formation de croûtes de battance, moins perméables. De ce fait, il faut renseigner le pourcentage de croûtes pouvant être présentes ainsi que la conductivité hydraulique des croûtes (Annexe V).

5.3.5.3. Paramètre d'érosion

Un dernier paramètre sur lequel le modèle s'appuie est le *splash delivery ratio* (SDR). C'est le rapport de la quantité de sol qui est détachée par l'énergie cinétique de la pluie (*effet splash*) sur la perte en terre totale d'une parcelle par ruissellement.

Donc lorsque ce rapport est nul, cela signifie que toute la quantité de terre détachée par le *splash* est redéposée (absence de ruissellement). Ce rapport vaut 1 quand toute la quantité de terre détachée par le *splash* est évacuée par le ruissellement. Lorsque le rapport est compris entre 0 et 1, seule la partie égale à ce rapport est évacuée par le ruissellement.

L'influence de ce paramètre sur les sorties du modèle sera démontrée dans la suite du document chapitre 7.1.1 Effet du *splash delivery ratio* (SDR).

5.3.6. Représentation des ouvrages dans le modèle

Le modèle openLISEM permet de prendre en compte les mesures anti-érosion. Il existe trois options : une option « buffers for water and sediments » qui permet de simuler le stockage de l'eau et des sédiments. Cette option est utilisée dans le cas d'un bassin de rétention par exemple. La deuxième option « sediment trap/fences » correspond au fonctionnement d'une fascine. Elle laisse s'écouler l'eau mais retient les sédiments. La dernière option est « grasstrip » qui permet de définir le coefficient de Manning de l'ouvrage directement dans l'interface pour des ouvrages dont la largeur est inférieure à la taille de la cellule. Pour utiliser cette option, il est nécessaire de fournir des cartes d'entrée supplémentaires : une pour la largeur de l'aménagement (*grasswid.map*) et une autre pour la conductivité hydraulique à saturation (*ksatgras.map*). Même si l'option a   t  e conçue pour des bandes enherbées, on peut l'utiliser pour d'autres types d'ouvrages en adaptant ces paramètres.

Dans cette étude, les bandes enherbées et de miscanthus auront une largeur multiple de la taille de la cellule (5m). Elles pourront être considérées comme occupation du sol, comme leur largeur est égale ou supérieure à la résolution. Leurs propriétés, à savoir le coefficient de Manning et la conductivité hydraulique à saturation, sont intégrées dans un tableau de correspondance lu par l'intermédiaire du script.

Les haies, quant à elles, ne peuvent être considérées comme une occupation du sol, car leur largeur est inférieure à la taille d'une cellule. Leur largeur varie de 0,8    1,6m. On les définira par l'option « grasstrips ». Le coefficient de Manning sera directement donné dans l'interface (Tableau 4).

Pour les fascines, l'option « Buffer for sediments trap » a été retenue. Gr  ce à cette méthode, on peut assigner une capacité de stockage pour chaque fascine (buffervol.map). La capacité de stockage de chaque fascine est déterminée en tenant compte de la hauteur de la fascine. Cette hauteur est de 80 cm. Le modèle fait l'hypothèse que les fascines ont une efficacité de piégeage en sédiments de 100%, or, sur le terrain, les mesures ont montré une efficacité variant entre 80 et 90%.

L'ensemble des ouvrages d'hydraulique douce ont été préalablement dessinés sur Arcgis puis convertis en fichier *ascii* et en fichier *map* pour être intégrés au modèle openLISEM.

5.3.7. Les sorties du modèle

Les cartes de sortie du modèle sont des cartes d'infiltration, de ruissellement, de pertes en terre, des zones de détachement et de dépôts.

De plus, on obtient deux fichiers de données : un résumé de l'ensemble des données et un fichier de données qui pour chaque pas de temps donne le débit de l'eau et des sédiments, la concentration en sédiments et les précipitations. Gr  ce à ces données, on peut retracer les s  digrammes et les hydrogrammes.

5.4. Critères d'évaluation d'efficacité des scénarios

L'évaluation de l'efficacité des différents scénarios reposera sur différents critères tels que la réduction du volume total (m^3), du débit de pointe à l'exutoire (l/s), des pertes en terre (t).

L'ensemble des scénarios sera comparé avec une référence. Les scénarios sont classés en deux groupes : les ouvrages placés sur des flux diffus et les aménagements sur les flux concentrés. Chacun sera comparé avec la référence qui sera paramétrée selon le type de flux, et notamment via le coefficient de Manning. Sur base de ces résultats, des règles de positionnement des ouvrages seront mises en évidence.

De plus, ce travail s'intéresse au paramétrage du modèle openLISEM et aux influences que ceux-ci ont sur le modèle. Des simulations mettront en évidence le rôle du paramètre ψ , du *splash delivery ratio*, de la présence d'un assolement avec une culture d'hiver et de la gestion des fossés.

5.5. Arbre de décision

La finalité de ce travail tend à déterminer des choix dans la localisation des ouvrages d'hydraulique douce. Sur base des résultats obtenus, un outil d'aide à la décision sera proposé sous forme d'un arbre de décision. Celui-ci tiendra compte des deux types de flux, des réductions pour chaque ouvrage (pertes en terre et débit de pointe) et inclura également des propositions d'aménagement ne se limitant pas aux parcelles agricoles, comme des enherbements de talwegs ou de fossés.

Pour chaque branche d'arbre, plusieurs propositions d'aménagement seront retenues et une analyse des différents points forts et faibles de chaque mesure sera proposée.

5.6. Scénarios optimisés

Sur base de cet arbre, un scénario optimisé a été élaboré pour chaque bassin versant. Ces scénarios sont aménagés en tenant compte des caractéristiques des bassins versants. Plusieurs ouvrages d'hydraulique douce sont implémentés selon le type d'écoulement rencontré, selon la topographie du lieu et selon les réductions visées (pertes en terre ou débit de pointe).

6. Zones d'études

Deux sites d'étude ont été choisis pour tester les différents scénarios de positionnement d'ouvrages d'hydraulique douce. Les deux bassins présentent des particularités qui seront détaillées dans ce chapitre.

6.1. Eckwersheim

Le premier bassin versant se situe dans la commune d'Eckwersheim, dans le département du Bas-Rhin (Figure 23). La commune fait partie de la région du Kochersberg, dominée par les loess. Le bassin versant fait 88 ha et est très agricole avec seulement 3 ha de forêt. La commune est parcourue par un cours d'eau, le Muehlbach, qui se trouve en aval du bassin versant étudié.

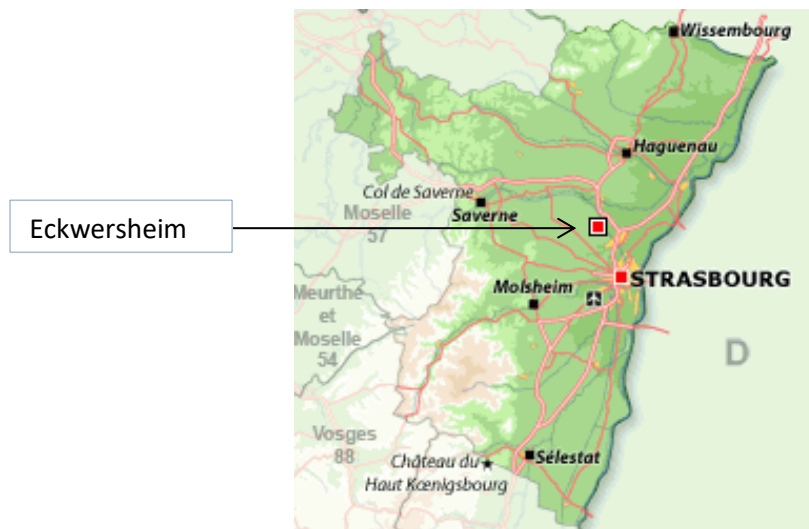


Figure 23. Localisation de la commune d'Eckwersheim⁶

La commune a été plusieurs fois victime d' v nements de type coulées d'eau boueuse. Les  v nements du 29 et 30 mai 2008 ainsi que l'événement du 21 mai 2012 ont été reconnus comme catastrophes naturelles (Préfecture du Bas-Rhin, 2014). Le 15 juin 2016, de la grêle et des pluies diluviennes se sont abattues sur la commune provoquant à nouveau des coulées d'eau boueuse.

Pour essayer de maîtriser les flux d'eau, plusieurs mesures de lutte ont été mise en place sur le bassin versant (Figure 24). Deux fascines mortes ont été installées en 2009 suite à l'événement de 2008 (Dernières nouvelles d'Alsace, 2009). Cependant, lors de la visite de terrain en mars 2017, ces deux fascines étaient en très mauvais état et leur efficacité est estimée très faible.

Suite au remembrement de 2015 qui a eu lieu dans la commune, on observe une structure paysagère non favorable à la mise en place d'action de lutte contre les coulées d'eaux boueuses. La taille moyenne des parcelles est de 5 ha allant jusque 15 ha. Les éléments paysagers, comme les pairies et les haies, qui permettent de freiner et d'intercepter les écoulements d'eau, sont quasi inexistantes.

Puisque la taille des parcelles augmente, la longueur des pentes augmente et conduit à une augmentation de l'érosivité du ruissellement. Les pourcentages de pente varient sur l'ensemble du bassin versant, avec une moyenne de 6%, mais peuvent atteindre près de 20% à certains endroits. La taille des parcelles constitue aussi un frein dans la mise en œuvre d'assolements concertés efficaces.

⁶ Source image : <http://www.vacances-location.net/locations-vacances/location-vacances-eckwersheim,bas-rhin.shtml>

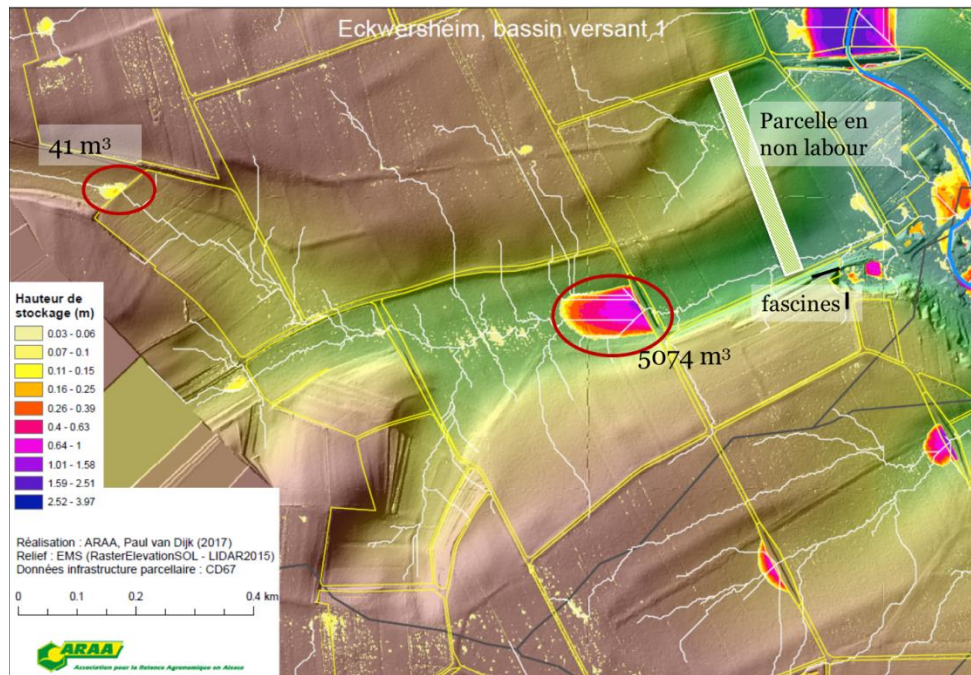


Figure 24. Positionnement des mesures de lutte contre l'érosion sur le bassin versant d'Eckwersheim

De plus, suite au remembrement et le risque accru qui s'en suivait, certains chemins ont été surélevés permettant une retenue d'eau en amont, d'une capacité de 41 et 5074 m³. Il est à noter qu'aucun dispositif de buses n'a été mis en place. L'eau stagne donc en amont et seuls les phénomènes d'infiltration et d'évaporation permettent l'évacuation de l'eau. Seule une parcelle du bassin versant est en non-labour.

Pendant le stage, le 12 mai 2017, la commune a connu un événement pluvieux qui a causé de l'érosion au sein des parcelles agricoles et des coulées de boue dans la rue principale de la commune et dans les maisons (Figure 25).



Figure 25. Coulée d'eau boueuse dans la rue à Eckwersheim le 12/05/17 (   Nicolas Rieffel)⁷

⁷ <http://www.dna.fr/actualite/2017/05/12/orage-inondations-dans-le-secteur-de-truchtersheim>

Les zones de rétention en amont des chemins surélevés ont été remplies (Figure 26) et ont débordé.



Figure 26. Remplissage des zones de rétention en amont des chemins surélevés

Les données de base à disposition pour ce bassin versant sont :

- Une image LIDAR à une résolution d'un mètre sur la zone (MNT 1m), fournie par l'Eurométropole de Strasbourg ;
- Un *shapefile* des parcelles agricoles avant le remembrement (  lots RPG) (Gouvernement premier ministre, 2014) ;
- Une carte des différents types de sols à l'échelle (1/100 000^e) (BD sols d'Alsace, ARAA) ;
- Des orthophotographies⁸ de 2011 (IGN).

6.2. Ruederbach

Le deuxième bassin versant étudié se situe sur la commune de Ruederbach, dans le sud du territoire alsacien, dans la région du Haut-Sundgau (Figure 27).

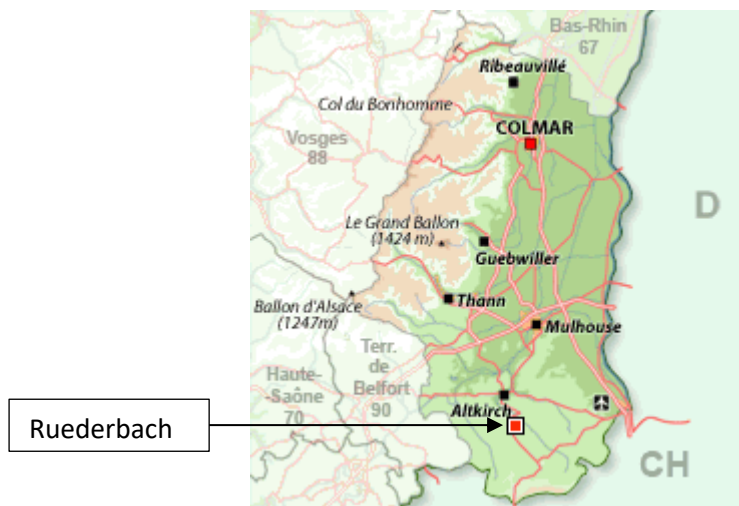


Figure 27. Localisation de la commune de Ruederbach⁹

⁸ Orthophotographies : Document photographique obtenu par redressement, mise à l'échelle et assemblage des surfaces élémentaires d'une photographie aérienne (source : Larousse).

⁹ Source image : <http://www.vacances-location.net/locations-vacances/location-vacances-ruederbach,haut-rhin.shtml>

Le bassin versant étudié a une superficie de 194 ha. C'est un bassin versant très agricole comportant 20 ha de prairies permanentes. Contrairement au bassin versant de la commune d'Eckwersheim, celui-ci est composé de plus petites parcelles, d'orientation variable. Il comporte un long réseau de fossés présent sur l'ensemble du bassin versant (Figure 28).



Figure 28. Etat des fossés à Ruederbach (© Hélène Leduc)

Les pentes varient de 2 à 6%, pouvant atteindre localement 10%.

L'ARAA a mis au point un indicateur « sensibilité et taille » des bassins versants (BV) face au risque potentiel de coulées d'eau boueuse. Celui-ci tient compte de la sensibilité à l'érosion et la taille du bassin versant. L'indicateur de sensibilité (%) correspond à une pondération linéaire des surfaces des 5 classes de sensibilité (Équation 1). Il prend la valeur 100% si la totalité de la surface (S_{Tot}) se trouve dans la classe de sensibilité "très forte" (classe 5) et 20% si toutes les surfaces se trouvent dans la classe 1.

Équation 1. Calcul de l'indicateur de sensibilité à l'érosion (%)

$$Indic_{-A} = 3 \frac{S_1 \cdot 1 + S_2 \cdot 2 + S_3 \cdot 3 + S_4 \cdot 4 + S_5 \cdot 5}{S_{Tot} \cdot 15} \cdot 100$$

Avec :

S_i : surface en classe de sensibilité i en ha

S_{Tot} : surface de toutes les classes 1 à 5 (ha)

L'indicateur « sensibilité et taille du BV » est obtenu en multipliant l'indicateur de sensibilité (%) avec le coefficient « taille BV » qui est défini selon la taille du bassin versant.

La commune présente un indicateur « sensibilité et taille » de 80,23, ce qui signifie que ce bassin versant présente un risque potentiel élevé de coulées d'eau boueuse.

Cette commune a connu un événement de type coulées d'eau boueuse le 24 juin 2016 qui a été reconnu comme catastrophe naturelle par l'arrêté du 26 juillet 2016 (Legifrance, 2016).

Lors de la visite du bassin versant, aucun dispositif d'hydraulique douce n'a été relevé de même qu'aucune mesure visant à réduire l'érosion au sein des parcelles agricoles.

Les données de base pour ce bassin versant sont :

- Une image LIDAR à une résolution de 0,5m couvrant la partie nord du bassin versant, fournie par le Conseil Départemental du Haut-Rhin (CD68) ;
- Une image raster à une résolution de 10 m couvrant la partie sud (aussi fournie par le CD68) ;
- Les *shapefiles* des parcelles (îlots RPG de 2012) (Gouvernement premier ministre, 2014) ;
- Une carte des types de sol à l'échelle 1/100 000^e (ARAA) ;
- Des orthophotographies de 2012 (IGN).

7. Résultats et interprétations

Tout d'abord, avant de présenter et d'analyser les résultats issus des simulations concernant l'hydraulique douce, diverses simulations préalables ont été effectuées pour connaître l'influence de certains choix que peut faire l'utilisateur du modèle. L'effet du *splash delivery ratio*, le facteur de calibration de ψ et l'effet des deux modèles d'écoulement (1D et 2D) ont été préalablement étudiés. Les résultats de cette analyse de sensibilité partielle ont permis de choisir les options à retenir pour la suite des simulations. Ensuite, le chapitre 7.2 reviendra sur les résultats des simulations des ouvrages d'hydraulique douce et sera suivi du chapitre 7.3 qui ouvrira quelques perspectives sur l'influence des cultures de printemps et du non-labour. Enfin, sur base des résultats des simulations des ouvrages d'hydraulique douce, des scénarios avec plusieurs types d'ouvrages ont été testés (chapitre 7.4).

7.1. Simulations préalables

7.1.1. Effet du *splash delivery ratio* (SDR)

Pour rappel, ce paramètre est le rapport de la quantité de sol qui est détachée par l'effet *splash* sur la perte en terre totale d'une parcelle (par ruissellement).

Les résultats des simulations avec un SDR = 0,01 et un SDR = 0,5 sont présentés dans le Tableau 6. Lorsque le paramètre vaut 0,5 le détachement issu de l'effet *splash* double par rapport à la référence où SDR = 0,01. On retrouve dès lors plus de sédiments en suspension lorsque SDR = 0,5. L'augmentation du détachement des particules de sol est compensée par une baisse du détachement par les flux d'eau de surface et des dépôts plus importants. Finalement, on observe des pertes en terre équivalentes (Tableau 6) et on peut conclure que le choix de la valeur du SDR n'a aucun impact sur les flux sortants à l'exutoire.

Tableau 6. Influence du splash delivery ratio

	splash delivery ratio [-]	
	0,01	0,5
Splash detachment (t)	42	104
Flow detachment (t)	2631	2622
Deposition (t)	-1838	-1891
Suspended Sediment (kg)	10	393
Total soil loss (t)	835	835
Total channel+OF discharge (m ³)	8524	8524

Par défaut, ce paramètre est fixé à 0,01. Le choix s'  st porté de le fixer à 0,5 dans la suite des scénarios. Comme le montre Kwaad *et al.* (1994), ce rapport peut atteindre de valeurs proches de 0,5 pour des systèmes de cultures avec un labour au printemps et sans couverture du sol pendant la période hivernale.

Le détail complet des résultats bruts est consultable en Annexe VI.

7.1.2. Effet du facteur de calibration de ψ

Le facteur de calibration de ψ a un rôle très important. Sa valeur par défaut est de 0,01, ce qui signifie que les valeurs initiales de ψ sont divisées par 100. Dans notre cas, les valeurs initiales de ψ sont de 17 cm. Avec cette pondération, on atteint des valeurs bien trop faibles pour des sols limoneux dont la gamme de valeurs s'étend de 5 à 30 cm (Rawls *et al.*, 1989). Lorsque la valeur de ψ est faible, cela

signifie que le sol n'exerce plus de succion et donc que l'eau s'infiltre moins. La part de ruissellement augmente, ce qui conduit à plus de détachement des particules de terre et un débit de pointe plus important.

La diminution de ψ peut-elle être assimilée à une situation où le sol est saturé ?

Une simulation avec une teneur en eau initiale (θ_i) proche de la teneur en eau à saturation (θ_{sat}) a été effectuée. On note que la forme de l'hydrographe est effectivement sensiblement la même (Figure 29). Cependant, les débits à l'exutoire et les volumes d'eau ruisselés sont plus importants lorsque le sol est saturé initialement. A contrario, les pertes en terre sont légèrement inférieures.

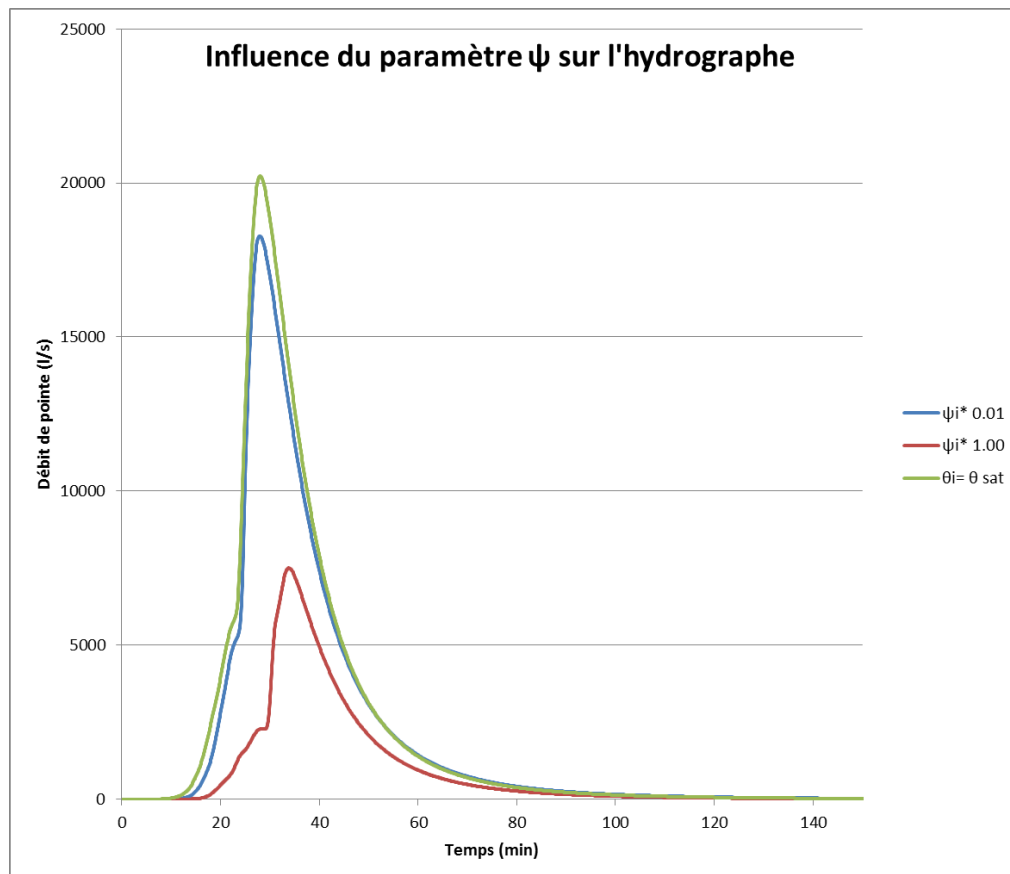


Figure 29. Influence de ψ sur la courbe de l'hydrographe

Afin de modéliser une situation où le sol n'a pas été préalablement saturé, le paramètre de calibration de ψ sera fixé à 1,00.

Le détail complet des résultats bruts est consultable en Annexe VII.

7.1.3. Effet du modèle d'écoulement hydraulique

La comparaison entre les deux modèles d'écoulement montre que les ordres de grandeur des débits de pointe à l'exutoire sont très différents selon le modèle choisi. Avec le modèle 1D (onde cinématique), le débit de pointe vaut 7500 l/s, alors qu'avec le modèle utilisant l'onde diffuse (2D), les valeurs obtenues sont autour de 1500 l/s. De plus, les volumes d'eau ruisselés avec le modèle 1D sont doublés par rapport au modèle 2D (Tableau 7).

Tableau 7. Récapitulatif des résultats des deux modèles

	Modèle 1D	Modèle 2D
Débit de pointe [l/s]	7500	1500
Volume d'eau [m ³]	8524	4022
Perte en terre [t]	834	287
Coefficient ruissellement [%]	28	13

Avec le modèle 1D, les zones d'infiltrations suivent les chemins d'eau, beaucoup plus marqués comme l'illustre la Figure 30a. Avec le modèle 2D, une large zone d'infiltration est observée, car l'eau peut diffuser dans plusieurs cellules voisines, les hauteurs d'eau sont réduites et le phénomène d'infiltration prend plus de l'importance (Figure 30b).

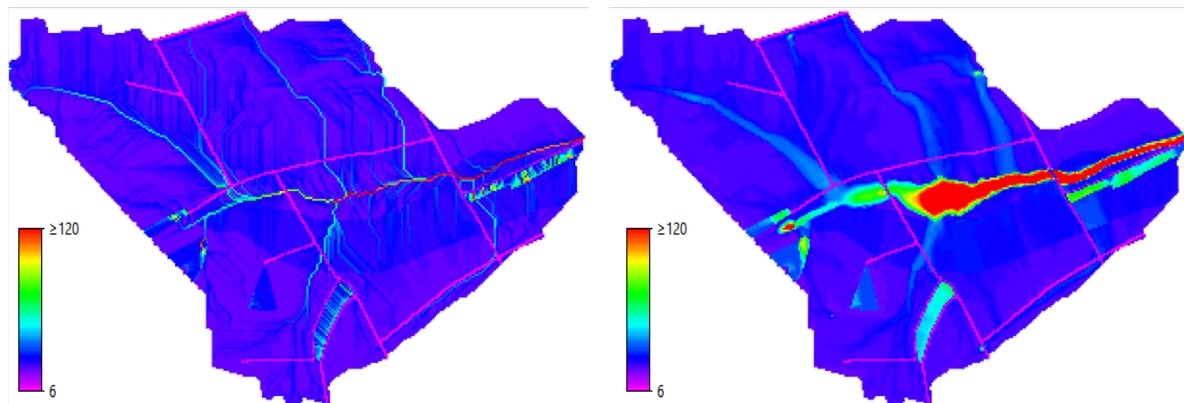


Figure 30. Carte d'infiltration (mm/h) de la référence : a. modèle 1D et b. modèle 2D

Etant donné l'augmentation du débit de pointe et des volumes d'eau dans le modèle 1D, les pertes en terre sont également plus importantes qu'avec le modèle 2D (Figure 31). Les zones de détachement sont plus nettes et suivent les écoulements d'eau dans le modèle 1D (Figure 31a), alors que pour le modèle 2D, ces pertes sont plus diffuses et les zones de dépôts sont plus nombreuses (Figure 31b).

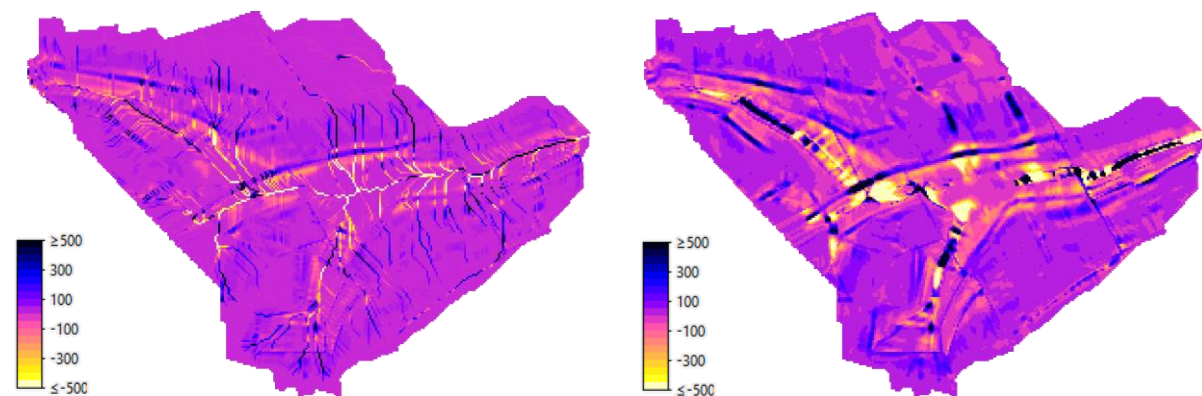


Figure 31. Carte des pertes en terre (t/ha) de la référence : a. modèle 1D et b. modèle 2D. Les valeurs positives représentent les zones de détachement des particules de terre et les valeurs négatives, les zones de dépôts.

Comme les écoulements d'eau peuvent s'étaler vers plusieurs cellules en aval, le modèle 2D demande un plus long temps de simulation et le temps de vidange du bassin versant est beaucoup plus important (pres de 450 min, contre 150 min pour le modèle 1D).

Comme les volumes ruisselés sont plus importants et que l'infiltration diminue dans le modèle 1D, le coefficient de ruissellement¹⁰ augmente, atteignant des valeurs de 28% contre 13% pour le modèle d'onde diffuse (Tableau 7).

Sur base de ces résultats, le modèle retenu est le modèle 1D malgré le fait qu'il ne soit pas complètement réaliste, car les chemins d'eau sont trop nets, et que la vidange se fait trop rapidement. Le modèle 2D, quant à lui, est trop diffus et nécessite un recalibrage complet de l'ensemble des paramètres de base pour être utilisé correctement. Ce n'est pas l'objectif de ce stage et ce modèle ne sera pas utilisé par la suite. Toutes les simulations sont faites avec le modèle 1D. Toutefois, les valeurs obtenues ne devront pas être prises en compte en absolu, car celles-ci sont susceptibles d'être surestimées par le modèle (V. Jetten, communication personnelle). Les résultats sont présentés selon l'efficacité du dispositif par rapport à la référence (%).

Le détail complet des résultats bruts est consultable en Annexe VIII.

7.2. Simulations des ouvrages d'hydraulique douce

Selon la méthodologie mise en place précédemment, les ouvrages ont été placés dans les deux bassins versants selon le type de flux rencontré.

À Eckwersheim, ce sont 1040 mètres linéaires d'ouvrage (soit 12m/ha) en flux diffus et 330 mètres (soit 3,8m/ha) pour les écoulements concentrés qui sont implantés fictivement lors des simulations.

Comme les fascines ne peuvent pas être positionnées à tous les endroits prédéterminés, elles sont en association avec des bandes enherbées. Il y a donc 290 mètres linéaires de fascines, associées à deux bandes enherbées dont les longueurs valent 300 et 450 mètres (Figure 32a) en flux diffus.

Pour les flux concentrés, les fascines n'ont pas été associées avec des bandes enherbées, car les localisations permettaient l'implantation de fascines à tous les endroits. Leur position est donc similaire aux bandes enherbées, aux bandes de miscanthus et aux haies (Figure 32b).

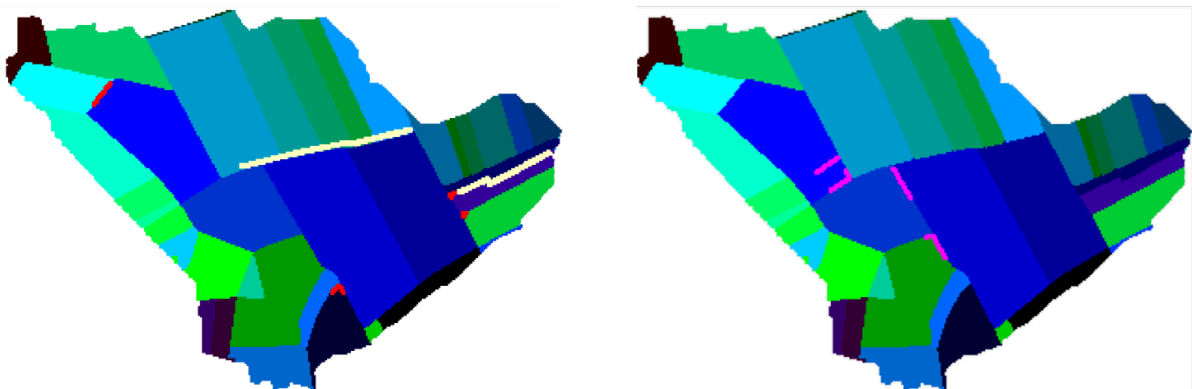


Figure 32. Localisation des ouvrages à Eckwersheim : a. écoulement diffus : les fascines sont en rouge, les bandes enherbées en jaune ; b. écoulement concentré : les fascines sont en rose

A Ruederbach, en écoulement diffus, ce sont 550 mètres de fascines associées à 2210 mètres de bandes enherbées, soit un total de 2760 mètres de haies (soit 14,2m/ha), de bandes de miscanthus et de bandes enherbées seules (Figure 33a). Pour les flux concentrés, par la présence des fossés, les

¹⁰ Coefficient de ruissellement : rapport entre la hauteur de la lame d'eau ruisselée et la hauteur d'eau précipitée (SIDESA)

localisations possibles sont moindres. 120 mètres de fascines associées à 300 mètres de bandes enherbées ont pu être implantées, soit un total de linéaire de 420 mètres (soit 2,1m/ha) (Figure 33b).

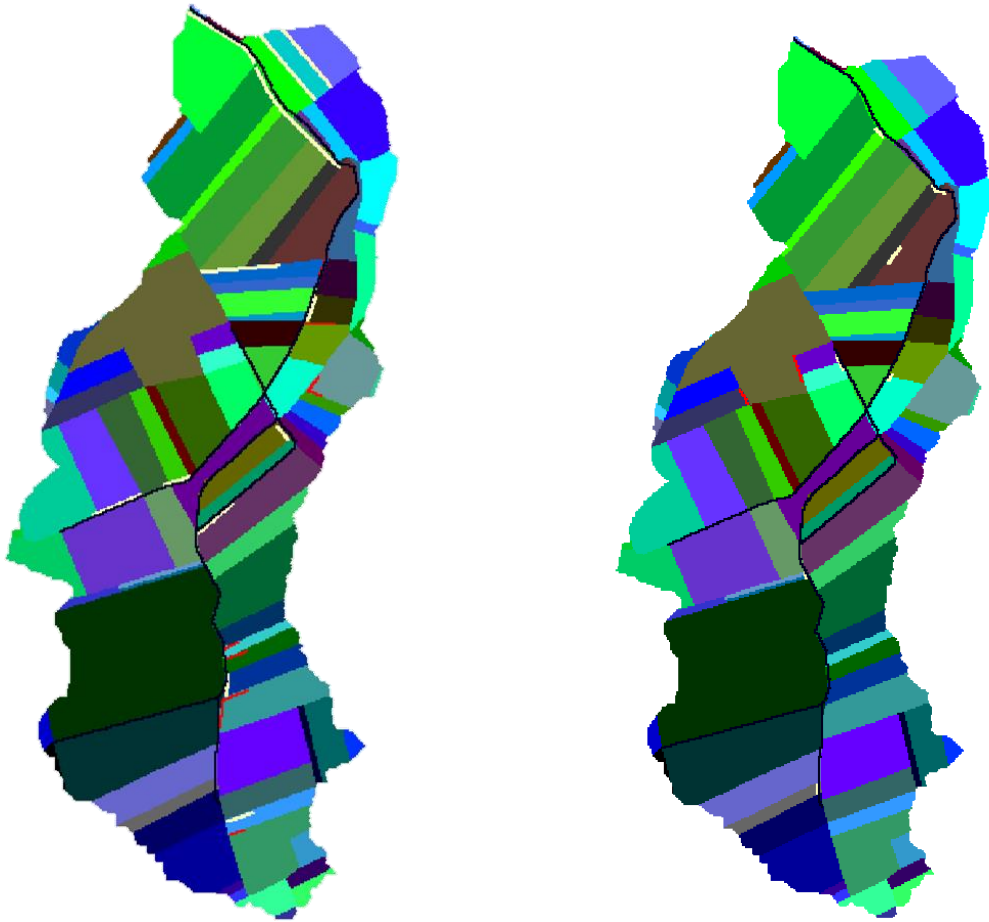


Figure 33. Localisation des ouvrages à Ruederbach : a. écoulement diffus et b. écoulement concentré. Les fascines sont en rouge, les bandes enherbées associées en jaune et les fossés en noir

Les résultats seront décrits dans les sous-sections suivantes. Tout d'abord, les tendances générales seront exposées au chapitre 7.2.1. Ensuite, le chapitre 7.2.2 s'intéressera à la dimension des ouvrages en relation avec le type de flux entrant. Au chapitre 7.2.3, les résultats reviendront sur la différence d'efficacité selon la nature de l'écoulement entrant. Enfin, selon les bassins versants étudiés et leurs caractéristiques, l'efficacité des ouvrages peut différer ; le chapitre 7.2.4 abordera les différences d'efficacité entre les deux bassins versants.

Lors des simulations, de nombreuses données ont été récoltées, avec les contraintes de temps imposées, il a été décidé de se focaliser sur les paramètres pouvant aider à réduire l'apparition des coulées d'eau boueuse à l'exutoire. Les sorties étudiées sont les pertes en terre (t), les volumes d'eau (m³) et les débits de pointe (l/s) à l'exutoire.

Le détail complet des résultats bruts est consultable de l'Annexe IX à l'Annexe XII.

7.2.1. Généralités globales

Le Tableau 8 reprend l'ensemble des résultats de toutes les simulations effectuées avec de l'hydraulique douce, selon le type de flux, le bassin versant étudié et largeur de l'ouvrage.

Tableau 8. Synthèse des efficacités des ouvrages sur le débit de pointe, le volume d'eau et les pertes en terre selon le type de flux entrant, le bassin versant étudié et la dimension de l'ouvrage

Flux diffus et « dimension modérée »						
	Débit de pointe		Volume eau		Pertes en terre	
	Ruederbach	Eckwersheim	Ruederbach	Eckwersheim	Ruederbach	Eckwersheim
Fascine	-6%	-20%	-3%	-6%	-3%	-11%
Haie	-2%	-4%	-2%	-4%	-14%	-9%
Miscanthus	-1%	-5%	-2%	-4%	-8%	-5%
Bande enherbée	-1%	-1%	-1%	-3%	-5%	-3%
Flux diffus et « dimension renforcée »						
	Débit de pointe		Volume eau		Pertes en terre	
	Ruederbach	Eckwersheim	Ruederbach	Eckwersheim	Ruederbach	Eckwersheim
Fascine	-8%	-22%	-5%	-8%	-4%	-12%
Haie	-2%	-7%	-4%	-7%	-23%	-13%
Miscanthus	-2%	-10%	-4%	-6%	-12%	-6%
Bande enherbée	-2%	-4%	-3%	-4%	-7%	-4%
Flux concentré et « dimension modérée »						
	Débit de pointe		Volume eau		Pertes en terre	
	Ruederbach	Eckwersheim	Ruederbach	Eckwersheim	Ruederbach	Eckwersheim
Fascine	-7%	-46%	-1%	-5%	-1%	-25%
Haie	-1%	-3%	-0.5%	-2%	-1%	-16%
Miscanthus	-2%	-3%	-0.3%	-2%	-2%	-2%
Bande enherbée	-0.2%	2%	-0.3%	-1%	-2%	-1%
Flux concentré et « dimension renforcée »						
	Débit de pointe		Volume eau		Pertes en terre	
	Ruederbach	Eckwersheim	Ruederbach	Eckwersheim	Ruederbach	Eckwersheim
Fascine	-7%	-46%	-1%	-5%	-2%	-25%
Haie	-1%	-5%	-1%	-4%	-14%	-22%
Miscanthus	-4%	-9%	-1%	-3%	-5%	-3%
Bande enherbée	0.5%	2%	-0.4%	-2%	-2%	-1%

En moyenne, les volumes d'eau sont peu réduits quel que soit l'ouvrage testé. Ceci peut s'expliquer par le fait que pour réduire à l'exutoire un volume d'eau précipité, celui-ci doit être soit infiltré, soit évaporé, soit intercepté par la végétation ou retenu dans des ouvrages de rétention. Le phénomène d'évaporation n'est pas pris en compte dans le logiciel openLISEM (Jetten *et al.*, 2017) car marginal à l'échelle de temps d'un événement pluvieux. De plus, le maïs est peu développé en mai en Alsace et a

donc une interception quasi nulle. De plus, les ouvrages testés ne sont pas des ouvrages permettant la retenue d'eau. La fascine est uniquement considérée comme une barrière pour les sédiments, mais pouvant laisser l'eau s'écouler. Cette hypothèse est discutable puisque lorsque les sédiments sont retenus par la fascine, ceux-ci colmatent les espaces entre les fagots et une quantité d'eau peut être retenue et infiltrée en amont de l'ouvrage. Les efficacités pour la fascine sont donc probablement sous-estimées. De plus, tous les ouvrages testés ont une capacité d'infiltration et sont donc capables d'infiltrer le ruissellement. Toutefois, l'emprise surfacique au sol est faible pour les fascines et les haies et malgré des capacités d'infiltration élevées (400 mm/h pour les haies), celles-ci ne peuvent pas réduire les volumes d'eau de manière significative. Les bandes enherbées et les bandes de miscanthus ont quant à elles des surfaces au sol plus importantes et c'est pourquoi, malgré une capacité d'infiltration plus faible (70 mm/h) que celle des haies, leur efficacité est similaire.

Etant donné la faible influence de l'hydraulique douce sur le volume d'eau, celui-ci ne sera pas étudié dans les chapitres suivants. Les résultats se concentrent sur les réductions du débit de pointe et des pertes en terre.

Les réductions observées sont plus importantes pour les débits de pointe et pour les pertes en terre. Il serait donc plus facile de travailler sur la réduction des pertes en terre et de la partie hydraulique, représentée par le débit de pointe, que sur l'hydrologie (dont les volumes d'eau) avec de l'hydraulique douce, d'où son nom.

Les fascines ont un rôle important dans la réduction du débit de pointe (jusque -20%) et dans le piégeage des sédiments (jusque -25%). Les volumes d'eau ruisselés, quant à eux, sont diminués entre 1 et 8%.

Les résultats montrent que les haies réduisent de 1 à 7% les débits de pointes, mais ont des efficacités intéressantes sur les pertes en terre (jusque -23%). Leur efficacité a tendance à être supérieure aux fascines. Il faut cependant prendre ces résultats avec précaution ; en effet, les fascines sont moins nombreuses que les haies puisque celles-ci sont en association avec des bandes enherbées où la topographie ne permet pas leur localisation.

Les bandes de miscanthus diminuent entre -2 et -10% le débit de pointe et de -2 à -12% les pertes en terre. Les volumes d'eau sont réduits de 0 à 6%.

Les bandes enherbées sont les dispositifs les moins performants pour réduire les débits de pointe (+0,5 à -4%) et les pertes en terre (de -1 à -7%). Les volumes d'eau ruisselés sont diminués entre 1 et 4%.

Ces résultats montrent une grande variabilité au sein des différents dispositifs selon le bassin versant étudié, le type de flux entrant et la dimension de l'ouvrage. La suite de ce chapitre aura pour but de décortiquer ces résultats selon ces trois variables.

7.2.2. Dimension des ouvrages

Lors de ce travail, différentes largeurs d'ouvrages ont été testées. Les bandes de miscanthus et les bandes enherbées mesurent 5 mètres dans le scénario où les ouvrages sont considérés de « dimension modérée », et elles font 10 mètres de large pour les scénarios avec une « dimension renforcée ». Les haies, quant à elles, sont composées de 3 ou 6 rangs. Les fascines sont associées à des bandes enherbées de 5 ou 10 mètres.

Aucune relation n'a pu être établie entre la largeur de l'ouvrage et le type de flux rencontré (Tableau 9). C'est-à-dire que les ouvrages de « dimension renforcée » sont tout aussi nécessaires pour les écoulements diffus que pour les flux concentrés.

Tableau 9. Synthèse de l'efficacité des ouvrages en fonction de leur dimension et des flux d'eau entrants, sur les débits de pointe et les pertes en terre : moyennes (± écart types)

	Flux diffus « dimension modérée »		Flux diffus « dimension renforcée »		Flux concentré « dimension modérée »		Flux concentré « dimension renforcée »	
	Débit de pointe	Perte en terre	Débit de pointe	Perte en terre	Débit de pointe	Perte en terre	Débit de pointe	Perte en terre
Fascine	-13(±10)%	-7(±6)%	-15(±10)%	-8(±6)%	-26(±27)%	-13(±16)%	-26(±27)%	-13(±16)%
Haie	-3(±2)%	-12(±4)%	-5(±3)%	-18(±8)%	-2(±2)%	-8(±11)%	-3(±3)%	-18(±6)%
Miscanthus	-3(±3)%	-6(±2)%	-6(±5)%	-9(±4)%	-3(±1)%	-2(±1)%	-6(±4)%	-4(±1)%
Bande enherbée	-1(±0,04)%	-4(±2)%	-3(±1)%	-5(±2)%	1(±1)%	-2(±1)%	1(±1)%	-2(±1)%

L'intensification des ouvrages permet d'augmenter leur efficacité. Cependant, cette efficacité n'est pas linéaire. Pour les bandes enherbées, en doublant leur surface, leur efficacité n'est pas fortement augmentée. Dans le cas où elles sont placées sur des types d'écoulement concentrés, l'efficacité n'augmente pas et reste stable. Ce résultat montre que pour les bandes enherbées, notamment en flux concentré, ce sont les premiers mètres de la bande qui sont utiles et qui ont un rôle prépondérant.

Pour les bandes de miscanthus, le gain d'efficacité est encore marqué à 10 mètres de large, quel que soit le type d'écoulement. De ce fait, des bandes de 10 mètres de large de miscanthus sont à préconiser pour réduire les débits de pointe et les pertes en terre.

Tout comme les bandes de miscanthus, la « dimension renforcée » des haies maximise leur efficacité et notamment pour les pertes en terre. Le doublement des rangées de haies permet d'augmenter l'efficacité de la réduction des pertes en terre de 10% en flux concentré et de 6% en flux diffus.

Les faibles augmentations de réduction des débits de pointe et des pertes en terre ne sont pas liées aux fascines à proprement parler, mais à l'augmentation de largeur des bandes enherbées qui leur sont associées. Comme pour les bandes enherbées seules, celles liées aux fascines fonctionnent de la même manière et leur augmentation de largeur influence peu l'efficacité sur les pertes en terre et le débit de pointe.

7.2.3. Type d'écoulement entrant

Les différentes simulations ont mis en évidence l'efficacité des ouvrages selon la nature de l'écoulement (Tableau 10).

Tableau 10. Synthèse de l'efficacité des ouvrages sur le flux entrant : moyennes (± écart types)

	Flux diffus		Flux concentré	
	Débit pointe	Perte en terre	Débit pointe	Perte en terre
Fascine	-14(±8)%	-7(±5)%	-26(±22)%	-13(±13)%
Haie	-4(±2)%	-15(±6)%	-2(±2)%	-13(±9)%
Miscanthus	-5(±4)%	-8(±3)%	-4(±3)%	-3(±1)%
Bande enherbée	-2(±1)%	-5(±2)%	1(±1)%	-2(±1)%

Premièrement, les bandes enherbées placées perpendiculairement à l'écoulement concentré ne sont pas adaptées. Une légère augmentation des débits de pointe est même observée. Ce résultat a déjà été obtenu lors de précédentes simulations par Paul van Dijk (communication personnelle, 2017). Les bandes enherbées, par leur coefficient de Manning, peuvent ralentir les flux d'eau jusqu'à les mettre en phase avec d'autres écoulements venant de plus loin du bassin versant. Il peut se produire une légère augmentation du débit de pointe à l'exutoire. Toutefois, les bandes enherbées réduisent les pertes en terre et les débits de pointe en flux diffus. Ces résultats sont cohérents avec ceux étudiés à l'échelle de la parcelle par Friconnet (2016) qui a mis en évidence la faible réduction de la vitesse de l'eau lorsque l'écoulement entrant est fort pour une bande enherbée placée perpendiculairement à la parcelle. Cependant, les réductions observées dans ce travail sont plus faibles que les chiffres annoncés dans la littérature. Les couverts herbacés peuvent réduire le ruissellement de 57 à 100% et les sédiments entre 75 et 85% (Ouvry *et al.*, 2012). Pour obtenir ces résultats, 10% de la surface de la parcelle est couverte par de l'herbe en aval de la parcelle. Dans cette étude, la largeur de la bande enherbée testée était trop faible. De plus, Duchemin *et al.* (2004) a synthétisé des résultats issus de la bibliographie (Tableau 11).

Tableau 11. Synthèse bibliographique sur l'efficacité des bandes enherbées à réduire la pollution diffuse sous pluies naturelles (adapté de Duchemin *et al.*, 2004)

Référence	Localisation	Largeur de la bande (m)	Pente (%)	Texture du sol	Paramètres	Réduction (%)
Arora <i>et al.</i> , 1996	USA, IA	20,1	2	Argile limoneuse	Sédiment Eau	40-100 9-98
Patty <i>et al.</i> , 1997	France	6-18	7-15	Limoneux	Sédiment Eau	87-100 43-100
Uusi-Kämpää <i>et al.</i> , 2000	Finlande	10	10	Argile	Eau	0-15
Duchemin <i>et al.</i> , 2002	Canada, QC	3-9	2-3	Limono sableux	Eau Sédiment	48-56 87-90

Les variations sont essentiellement dues à la capacité de la bande enherbée à infiltrer lors de fortes précipitations. De plus, leur efficacité diminue avec l'augmentation de ruissellement en amont. C'est pourquoi les bandes enherbées doivent être localisées de préférence là où les surfaces en amont sont faibles (écoulement diffus).

La fascine est l'ouvrage le plus efficace aussi bien pour les flux diffus que concentrés. Cependant, elles agissent mieux pour les flux concentrés avec des réductions de -14% contre -9% en flux diffus. En plus de réduire le débit de pointe, elles réduisent les pertes en terre. Elles peuvent donc être perpendiculaires à un talweg, en bout de parcelle pour protéger une route, des habitations ou au pied d'un versant dont les pentes sont occupées par une culture à risque (Ouvry *et al.*, 2012).

En moyenne, les haies arbustives ont une efficacité légèrement supérieure sur les pertes en terre et sur les débits de pointe en flux diffus qu'en écoulement concentré. Bien que les réductions du débit de pointe soient moins importantes que pour les fascines, les haies peuvent être placées aux mêmes endroits que les fascines. Un avantage de ce dispositif est qu'il ne nécessite pas de topographie particulière pour être mis en place. Les réductions des pertes en terre sont importantes par rapport à ce que Friconnet (2016) a trouvé. Cela s'explique par le fait que dans cette étude, la haie a été considérée comme bien développée, avec une bonne reprise des tiges au niveau du sol. L'étude menée

par l'AREAS montre que 74 à 99% des particules de terre sont retenues par les haies (Ouvry *et al.*, 2012).

En moyenne, les bandes de miscanthus réduisent les débits de pointe de 4 à 5% selon l'écoulement. Ces résultats sont en accord avec l'étude de McGregor *et al.* (1999), qui a montré des efficacités sur le ruissellement des haies herbacées de 5 à 7%. Cependant, l'étude montre des réductions en perte en terre bien plus importantes (57 à 75%), alors que les simulations ont montré des réductions de 5 à 8%. Peu d'études ont été réalisées sur l'efficacité du miscanthus face au ruissellement et aux pertes en terre.

7.2.4. Différences entre bassins versants

Les caractéristiques des deux bassins versants (BV) testés influencent directement les résultats obtenus (Tableau 12).

Tableau 12. Synthèse de l'efficacité des ouvrages sur le débit de pointe, le volume d'eau et les pertes en terre selon le bassin versant : moyennes (\pm écart types)

	Débit pointe		Volume eau		Pertes en terre	
	Ruederbach	Eckwersheim	Ruederbach	Eckwersheim	Ruederbach	Eckwersheim
Fascine	-7(\pm 1)%	-33(\pm 14)%	-2(\pm 2)%	-6(\pm 1)%	-2(\pm 1)%	-18(\pm 8)%
Haie	-1(\pm 1)%	-5(\pm 2)%	-2(\pm 2)%	-4(\pm 2)%	-13(\pm 9)%	-15(\pm 6)%
Miscanthus	-2(\pm 1)%	-7(\pm 3)%	-2(\pm 2)%	-4(\pm 2)%	-7(\pm 4)%	-4(\pm 2)%
Bande enherbée	-1(\pm 1)%	0,1(\pm 3)%	-1(\pm 1)%	-2(\pm 1)%	-4(\pm 2)%	-2(\pm 1)%

Les efficacités sont globalement plus faibles pour le bassin versant de Ruederbach que pour celui d'Eckwersheim, pour chaque critère d'évaluation étudié.

Les fascines, les haies et les bandes de miscanthus ont une efficacité plus grande sur le débit de pointe à Eckwersheim. Par contre, le phénomène d'augmentation du débit de pointe avec les bandes enherbées n'est pas présent à Ruederbach.

Les bandes enherbées et les bandes de miscanthus ont une plus grande efficacité sur les réductions des pertes en terre à Ruederbach qu'à Eckwersheim.

Les différences entre les bassins versants sont expliquées par leurs caractéristiques et notamment les fossés. Ce réseau de fossés est assimilé à un écoulement concentré et a empêché de mettre en place une densité de linéaire équivalente dans les deux bassins versants. A Eckwersheim, la densité de linéaire est de 3,8 m/ha alors qu'elle est de 2,8 m/ha à Ruederbach. De plus, à Eckwersheim, les résultats concernant les fascines sont majoritairement conditionnés par la présence d'une fascine positionnée à l'endroit du chemin surélevé (qui n'a pas été modélisé lors des simulations), mais qui le sera dans la section 7.3.2.3.

7.3. Simulations complémentaires

7.3.1. Actions agricoles

Comme montré précédemment, les ouvrages d'hydraulique douce ont un impact très limité sur les volumes d'eau ruisselés. Les réductions des débits de pointe, et des pertes en terre sont intéressantes mais ne permettent pas d'éviter les coulées d'eau boueuses. Ces mesures d'interception sont des mesures palliatives, qui ne résolvent pas le problème à la source. Pour montrer l'influence des pratiques agricoles et l'utilité de la diversification des cultures, deux simulations ont été réalisées.

L'une avec un assolement concerté, avec 30% de culture d'hiver, et une autre en posant l'hypothèse que l'ensemble des parcelles sont cultivées avec des techniques culturales modifiées, du type non-labour (Tableau 13). Le détail complet des résultats est consultable en Annexe XIII et Annexe XIV.

Tableau 13. Résultats des actions d'assolement concerté et de non-labour sur les deux bassins versants

	Assolement concerté		Non-labour	
	Eckwersheim	Ruederbach	Eckwersheim	Ruederbach
Débit de pointe	-21%	-28%	-86%	-69%
Volume d'eau	-20%	-26%	-70%	-58%
Perte en terre	-33%	-39%	-48%	-75%

Les résultats pour la simulation d'un assolement concerté sont encourageants. Tous les critères d'évaluation sont réduits d'au moins 20%. Les cultures d'hiver sont plus développées au mois de mai et juin que les cultures de printemps. La couverture du sol permet de le protéger contre l'intensité des pluies et diminue le détachement des particules de sol : elle diminue donc les pertes en terre à l'exutoire.

Puisque les cultures sont à un stade de développement plus avancé, leur système racinaire est plus développé et permet une meilleure infiltration des flux d'eau entrants. L'eau infiltrée réduit les volumes d'eau. De plus, les cultures d'hiver comme le blé sont semées avec un inter-rang plus faible que les cultures de printemps comme le ma   (80cm), la pomme de terre (50-75 cm) ou encore la betterave (45 cm), ce qui limite la présence de sol nu. Un sol couvert limite les ruissellements d'eau par rapport à un sol nu (Derancourt, 1995).

Les résultats pour les techniques culturales sans labour montrent des réductions significatives sur le débit de pointe, le volume d'eau et les pertes en terre entre 48 et 86%. La technique du non-labour vise à éviter le retournement du sol et de réduire la profondeur de passage des outils. Elle permet de maintenir une couverture de résidus de la culture précédente sur le sol pour le protéger. La présence des résidus de cultures à la surface du sol amène de la matière organique au sol et améliore sa structure, ce qui le rend moins sensible aux phénomènes de battance¹¹ (Figure 34a et b) (Bernoux *et al.*, 2011). Les effets du non-labour sur le ruissellement ont déjà été observés sur des parcelles à Geispitzen en 2008. Les parcelles en non-labour génèrent peu ou pas de ruissellement par rapport aux parcelles en labour (van Dijk *et al.*, 2008). Cette simulation est en accord avec la littérature, qui démontre que la réduction du travail du sol (non-labour ou travail réduit du sol) entraîne une réduction des flux de sédiments (Seitz *et al.*, 2015 ; Van Pelt *et al.*, 2017). Toutefois, les efficacités obtenues ici sont plus importantes que dans leurs études, ce qui pourrait s'expliquer par la différence d'échelle :   tude à l'échelle de la parcelle agricole et, dans ce cas-ci, une étude à l'échelle d'un bassin versant.

¹¹ Ce phénomène est d   à aux précipitations qui, par leur énergie cinétique, détachent les particules de sol qui en rejaillissant viennent obstruer la porosité du sol, ce qui donne une couche imperméable appelée croute de battance. (Source : <http://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/Battance.html>)



Figure 34. a. Croute de battance dans un champ de maïs labouré et b. absence de croute de battance dans le champ avec des techniques sans labour (photos prises le 2/6/17 à Mundolsheim, Alsace) (   Hélène Leduc)

7.3.2. Aménagements

7.3.2.1. Aménagement des fossés

Le bassin versant de Ruederbach est marqué par un réseau de fossés. Leur aménagement peut contribuer à réduire les débits d'eau et les pertes en terre à l'exutoire. Plusieurs scénarios ont été imaginés. Le premier, qui sera la référence, est l'aménagement des fossés tels qu'ils sont pour le moment, c'est-à-dire des fossés non curés, avec présence d'herbacées et de ronces.

Pour montrer l'influence de ces fossés, une simulation a fait l'hypothèse que ceux-ci étaient bétonnés. Ce qui a pour effet de réduire le coefficient de Manning, celui-ci vaut alors 0,013. Une deuxième simulation les a considérés comme des fossés enherbés avec un coefficient de Manning égal à 0,08 (Nicklow *et al.*, 2006) Enfin deux autres simulations ont été réalisées en essayant de reproduire l'effet d'un fossé    redent. L'une considère un fossé    redent v  g  tal  s   et l'autre tient compte uniquement des redents. Pour ce faire, la pente des fossés a été réduite. Le fossé comporte une pente initiale de 1,5% (0,015m/m). Si des redents de 0,5m de haut et espacés de 25m (Irstea, 2014) sont ajoutés, la pente moyenne équivalente est de 0,5% (0,005m/m). Le coefficient de Manning de la référence est fixé à 0,03 pour l'état des fossés en place.

Ces résultats montrent que les aménagements des fossés ne constituent pas une solution pour réduire les volumes d'eau et les pertes en terre de manière significative. Par contre, l'aménagement des fossés a une influence sur le débit de pointe à l'exutoire (Tableau 14). Le détail complet des résultats est consultable en Annexe XV.

Les fossés en béton augmentent le débit de pointe, les volumes d'eau et les pertes en terre. L'augmentation de débit de pointe est due à une augmentation des vitesses d'eau qui sont liées à la réduction de la rugosité (coefficient de Manning).

L'enherbement des fossés réduit de 42% le débit de pointe, mais une très faible réduction est observée pour les pertes en terre et les volumes d'eau. Les redents, à eux seuls, réduisent le débit de pointe de 24%. La combinaison d'un enherbement et de redents réduit plus fortement le débit de pointe (61%).

Tableau 14. Efficacité de la gestion des fossés à Ruederbach

	Débit pointe [l/s]	Volume eau [m ³]	Pertes en terre [t]
Béton (n=0,013)	23%	0.1%	0.9%
Enherbement (n=0,08)	-42%	-0.2%	-0.8%
Redents (i=0,5%)	-24%	-0.1%	-0.5%
Redent et enherbement (i=0,5% et n=0,08)	-61%	-1%	-1.1%

La gestion des fossés influence directement et de manière significative les débits de pointe à l'exutoire. Le rôle de l'herbe et de sa capacité d'infiltration est directement observé.

La présence de redents ralentit les flux d'eau en les stockant temporairement et pourrait conduire à des débordements des fossés. Cette possibilité n'a pas été étudiée lors de ce travail, mais le logiciel openLISEM peut le simuler.

7.3.2.2. Aménagement des berges

En cas de débordement des fossés, il serait utile d'aménager les berges. Une option serait de considérer les parcelles le long de ceux-ci comme prairies inondables, mais cette solution est peu réaliste.

Une autre solution serait de considérer les fossés comme des cours d'eau permanents ou temporaires et nommés. Dès lors, une bande enherbée de 5 mètres de part et d'autre du fossé devient obligatoire (Legifrance, 2015). Cette mesure a été étudiée, en laissant l'état actuel des fossés, elle réduit de 4,8% les pertes en terre à l'exutoire. L'efficacité sur le débit de pointe et les volumes d'eau est marginale (1%). Le détail complet des résultats bruts est consultable en Annexe XIV.

7.3.2.3. Rôle des bassins de rétention

Dans le bassin versant d'Eckwersheim, deux chemins surélevés sont présents. Pour les simulations précédentes, ils n'ont pas été pris en compte. Ceux-ci peuvent s'assimiler à des bassins de rétention, toutefois leur conception n'est pas réglementaire, aucun débit de fuite n'est possible. Les résultats montrent que les volumes d'eau ruisselés sont diminués de 11%. Le rôle d'un bassin de rétention est de stocker les eaux de ruissellement, ce qui permet diminuer le débit de pointe. Ici, la réduction est de 9%. Le détail complet des résultats bruts est consultable en Annexe XIII.

7.4. Programme d'actions combinées

7.4.1. Arbre de décision

Sur la base des résultats des différentes simulations réalisées, l'objectif de ce travail était de mettre en évidence des règles de décision. Un arbre de décision a été construit pour mettre en évidence le type d'ouvrage à privilégier selon la nature de l'écoulement (Figure 35). De plus, les ouvrages ont été classés selon leur efficacité sur les réductions du débit de pointe et des pertes en terre. Cet arbre intègre en plus des ouvrages d'hydraulique douce et les résultats des simulations complémentaires agissant sur

la gestion des fossés. Plusieurs solutions sont possibles selon l'endroit, le type de flux et le type de réduction recherché.

Pour réduire les pertes en terre en écoulement diffus, les haies, les bandes de miscanthus et les fascines sont des dispositifs adéquats. Dans une moindre mesure, les bandes enherbées peuvent aider également.

Pour réduire le débit de pointe en écoulement diffus, la fascine et les bandes de miscanthus sont bien adaptés ainsi que la haie, dans une moindre mesure.

Pour lutter contre les pertes en terre en écoulement concentré, les haies et les fascines doivent être utilisées.

Concernant la réduction du débit de pointe, lorsqu'un fossé est présent dans le bassin versant, la meilleure solution le mieux est de l'enherber. Lorsqu'aucun fossé n'est présent, il est possible d'enherber le talweg ou de mettre en place des fascines et des bandes de miscanthus.

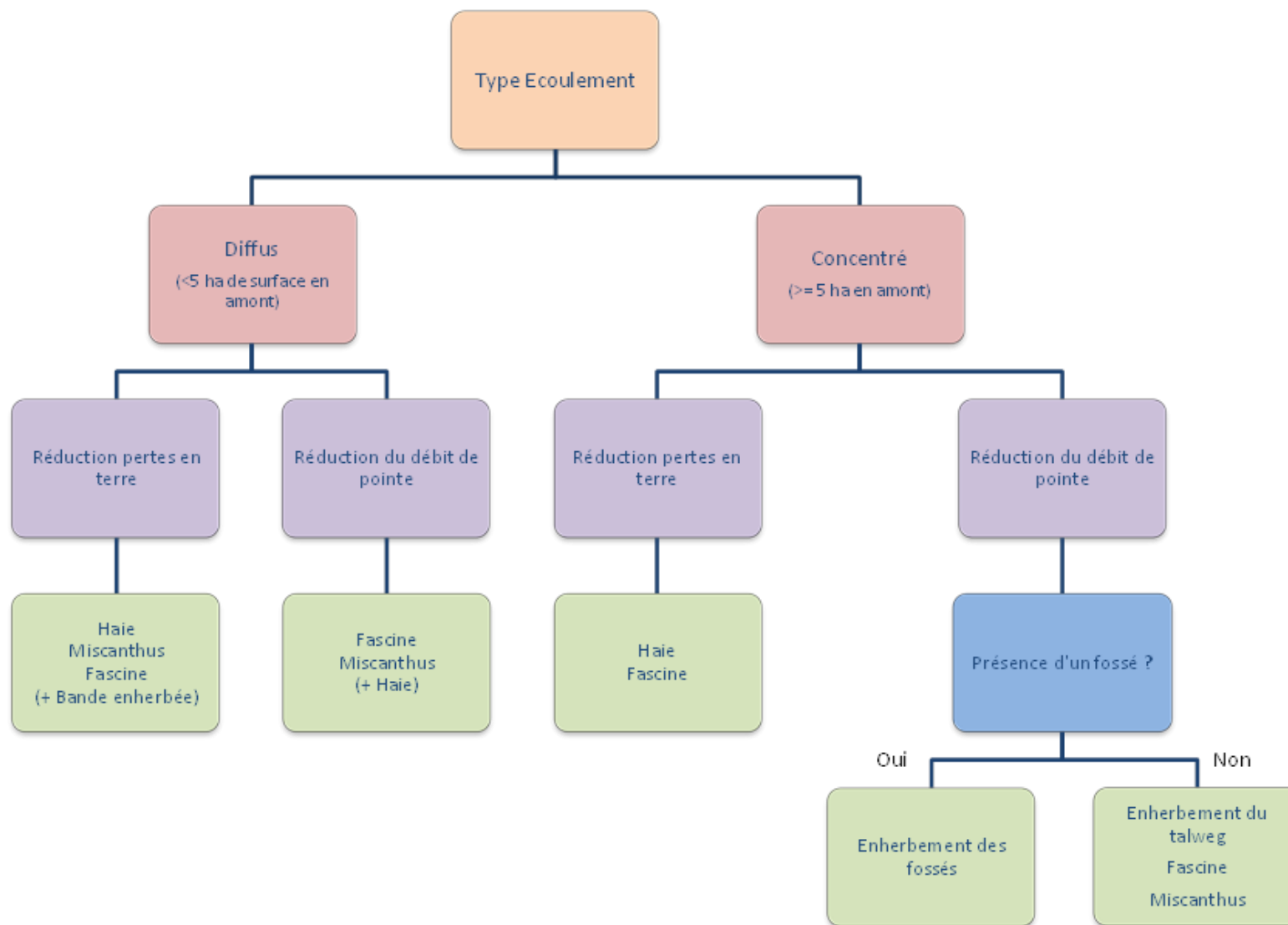


Figure 35. Arbre de décision

Pour faire un choix parmi les différentes solutions proposées, des graphiques sous forme de radar ont été construits reprenant les caractéristiques hydrauliques des différents ouvrages (Figure 36) ainsi que d'autres critères (Figure 37) : l'efficacité immédiate de l'ouvrage lors de son installation, la durée de vie de celui-ci, l'emprise au sol, la capacité à favoriser la biodiversité et la valorisation possible. Des notes sont attribuées allant de 1 (très faible) à 5 (très important). L'aspect financier (coûts d'installation et d'entretien) n'a pas été pris en compte dans cette analyse, car jugé trop complexe et souvent influencé par des aspects de politiques locales.

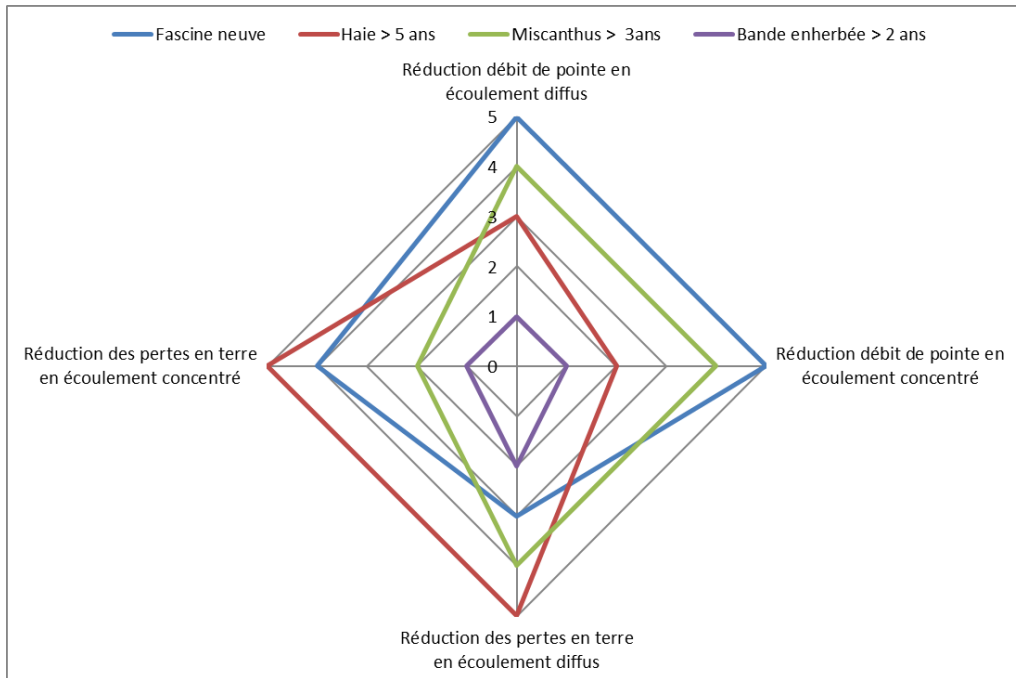


Figure 36. Radar des critères hydrauliques pour chaque ouvrage testé. Les notes vont de 1 (très faible) à 5 (très important).

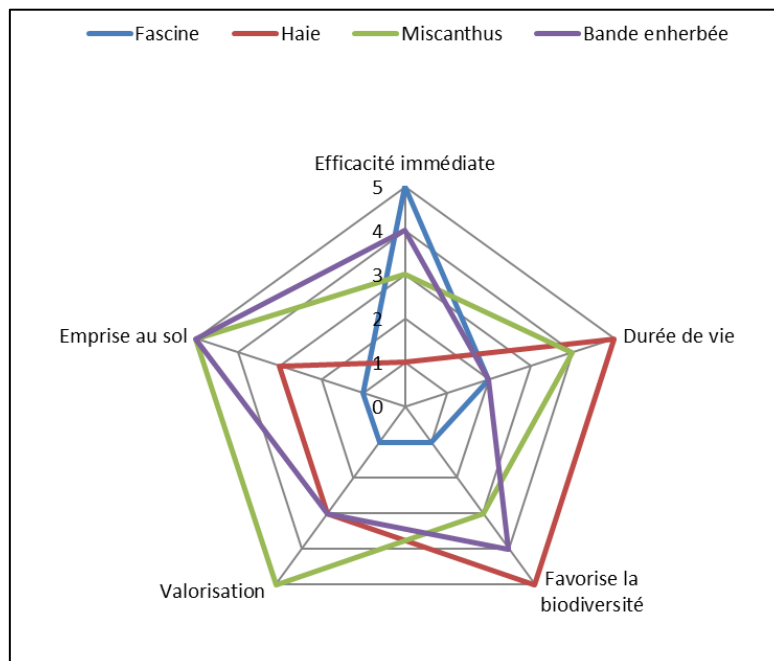


Figure 37. Radar des critères supplémentaires à prendre en compte dans l'implémentation d'un ouvrage. Les notes vont de 1 (très faible) à 5 (très important).

Ces graphiques montrent que la fascine, en plus d'avoir des bénéfices sur l'aspect hydraulique, est un ouvrage avec peu d'emprise au sol et une efficacité immédiate. A contrario, elle a une faible durée de vie, ce qui est d   à son remplissage rapide et la dégradation progressive des bois morts. Elle favorise peu la biodiversité et les possibilités de valorisation sont nulles.

La haie est un ouvrage qui prend du temps à se développer : son efficacité immédiate est donc faible, mais sa durée de vie est très longue. De plus, son emprise au sol est raisonnable et elle favorise la biodiversité. Il est également possible de valoriser les tailles selon l'espèce d'arbre implantée.

Les bandes de miscanthus sont larges d'au moins de 10 mètres (de préférence) et leur emprise sur les surfaces agricoles est importante. Ces bandes sont des zones de refuge pour les animaux. De plus, les pailles de miscanthus peuvent être valorisées énergétiquement (méthanisation). Sa durée de vie et son efficacité immédiate sont jugées satisfaisantes.

Les bandes enherbées sont aussi larges que le miscanthus et occupent donc une part non négligeable des parcelles agricoles. Leur efficacité immédiate est importante, tout comme leur capacité à favoriser la biodiversité lorsque différentes espèces végétales sont implantées. Les possibilités de valorisation des bandes enherbées sont faibles et leur durée de vie courte ; cela est d   à aux dépôts de sédiments sur ces bandes qui affectent leur efficacité au cours des successions d'  v  nements pluvieux.

7.4.2. Actions combinées

Sur base de l'arbre de décision construit, des simulations supplémentaires ont été testées afin d'évaluer l'efficacité d'un programme tenant compte du meilleur ouvrage pour le type de flux associé, pour réduire le débit à l'exutoire et les pertes en terre. Un scénario a été implanté sur le bassin versant de Ruederbach et un sur celui d'Eckwersheim. Les simulations ont été effectuées avec des parcelles cultivées en maïs. Ces solutions d'aménagement restent des propositions qui doivent être conciliées et discutées avec l'ensemble des acteurs de terrain.

Sur la commune d'Eckwersheim, une partie du talweg a été enherbée. Des fascines ont été placées contre les flux diffus et concentrés, là où la topographie le permettait. Aux endroits restants, ce sont des haies, en 6 lignes, qui ont été privilégiées (Figure 38). La densité de linéaire est de 15,6m/ha, ce qui peut être caractérisé d'intensité d'aménagement de type « forte », en comparaison avec les chiffres de Karel Vandaele et ceux de la Chambre d'Agriculture d'Alsace (Tableau 2. Densité de fascines et appréciation de l'intensité d'aménagement du bassin versant (C. Cugnière et R. Michael, communication personnelle 2017) Tableau 2 et Tableau 3 au chapitre 4.4.2).

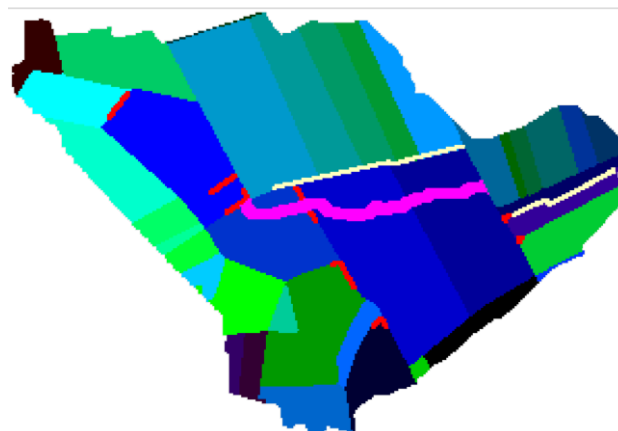


Figure 38. Schéma d'aménagement du bassin versant d'Eckwersheim. En rouge, les fascines, en jaune les haies et en rose, le chenal enherbé

A Ruederbach, les fossés ont été enherbés et des fascines placées pour les flux diffus et concentrés où la topographie le permettait. En complément, pour les flux diffus, des haies en 6 lignes ont été implantées, et contre les flux concentrés, des bandes de miscanthus de 10 mètres de large ont été préconisées (Figure 39). La densité d'ouvrage est de 16,4m/ha qui est un aménagement en densité de type fort (Karel Vandaele ; Chambre d'Agriculture d'Alsace).

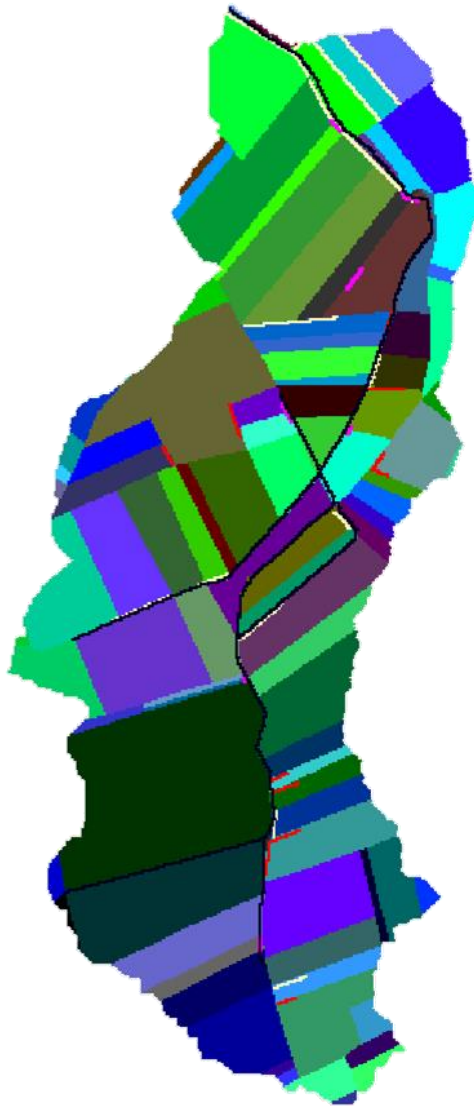


Figure 39. Proposition d'aménagement sur le bassin versant de Ruederbach. En rouge, les fascine, en jaune, les haies et les bandes de miscanthus en rose

Les résultats de ces simulations sont encourageants (Tableau 15). Les solutions proposées aménagent les bassins versants contre les flux diffus et concentrés, tout en variant les différents types d'ouvrages.

Pour les deux bassins versants, les débits de pointe et les pertes en terre sont largement diminués. Les efficacités varient de -44% jusqu'à -65%. Toutefois, les volumes d'eau ne sont pas fortement réduits. Le détail complet des résultats bruts est consultable en Annexe X et en Annexe XII.

Comme dit précédemment, il est compliqué de réduire les volumes d'eau uniquement avec des ouvrages d'hydraulique douce. Ces simulations ne tiennent pas compte de l'assolement concerté.

Tableau 15. Résultats d'aménagements combinés sur les deux bassins versants

Aménagement combiné		
	Eckwersheim	Ruederbach
Débit de pointe	-44%	-47%
Volume d'eau	-22%	-5%
Perte en terre	-44%	-65%

8. Limites de l'étude

Tout d'abord, dans ce travail, seuls les débits de pointe, les pertes en terre et les volumes d'eau ont été analysés. Pourtant, le logiciel a fourni de nombreuses autres sorties comme le volume d'eau intercepté, le volume d'eau infiltré, le volume stocké à la surface, le temps après lequel le débit de pointe et le pic de précipitations sont atteints, la quantité de terre détachée par *effet splash*, la quantité de terre déposée au sein du bassin versant. Il serait intéressant de connaître l'influence des ouvrages sur ces sorties pour mieux comprendre leur fonctionnement. Des dispositifs peuvent modifier la forme de l'hydrographe, en étalant dans le temps les quantités d'eau arrivant à l'exutoire, ce qui est plus facile à maîtriser qu'un écoulement en un seul pic arrivant peu de temps après le pic de précipitations.

De plus, les résultats de ce travail sont issus de simulations. Toute simulation comprend des incertitudes sur les mesures, c'est pourquoi il a été décidé de montrer une comparaison en pourcentage plutôt que les résultats bruts qui sont surestimés par le modèle. L'ensemble des paramètres utilisés dans le modèle sont des paramètres qui ont été mesurés sur le terrain ou issus de la littérature, ce paramétrage peut par conséquent être discutable. Les coefficients de Manning (pour les cultures et pour les ouvrages), le paramètre ψ et K_{sat} sont des facteurs prépondérants dans les phénomènes d'érosion et leur sensibilité a des conséquences significatives sur les sorties du modèle. Les valeurs des paramètres sont uniquement valables pour la région limonaise d'Alsace en mai, ce paramétrage doit être entièrement revu si l'on veut travailler sur une autre région ou à une saison différente.

Une autre limite et contrainte de l'étude était qu'aucune donnée sur les deux bassins versants n'était disponible. L'hypothèse que les deux bassins versants fonctionnent de la même manière est un peu grossière. Cela a été mis en évidence dans les résultats qui comparaient les efficacités dans les deux bassins versants. Pour tenir compte de cette variabilité et de la sensibilité des paramètres, une proposition serait de calibrer le modèle via des mesures in situ : événement pluvieux, teneur en eau du sol initiale et la succion au front d'humectation (ψ). De plus, en mesurant le débit de pointe à l'exutoire et les quantités de terre à l'aval du bassin versant, le modèle pourrait être mieux calibré (option de calibration et de pondération des paramètres dans le logiciel openLISEM).

Ensuite, le choix de pluie est discutable, des simulations complémentaires devraient être lancées pour mieux comprendre l'influence de la pluie et la capacité des ouvrages d'hydraulique douce. En effet, les résultats ont montré leur efficacité sur un événement orageux. Statistiquement, les bassins versants sont plus souvent sujets à des événements pluvieux de moindre intensité et l'hydraulique douce pourraient avoir une efficacité plus importante pour ces événements. Une simulation avec un événement plus important pourrait également être lancée afin de connaître la limite d'efficacité des ouvrages d'hydraulique douce.

9. Conclusion

En conclusion, ce travail est une premi ere étude sur l'efficacité des ouvrages d'hydraulique douce à l'échelle d'un bassin versant. Les résultats ont montré des efficacités plus faibles que lorsque ceux-ci sont étudiés à l'échelle de la parcelle. Il est donc nécessaire de continuer des études dans ce sens pour pouvoir généraliser les efficacités à l'échelle d'un bassin versant ainsi que de trouver les caractéristiques des bassins versants qui conditionnent ces efficacités.

De plus, les résultats des simulations par le logiciel openLISEM ont montré que lorsqu'un seul type d'ouvrage est présent sur le bassin et qu'il n'est mis que pour un seul type d'écoulement, les diminutions des pertes en terre, du débit de pointe et des volumes d'eau sont faibles. Il est donc important d'aménager un bassin versant contre les flux entrants diffus (< 5 ha de surface en amont) mais également contre ceux concentrés (  5 ha de surface en amont). De plus, pour avoir une efficacité optimale, la mise en place de divers ouvrages est nécessaire, comme l'ont montré les simulations des scénarios combinés. Ces aménagements ont pour but de limiter la connectivité des écoulements et de réduire le transfert du ruissellement entre les parcelles agricoles. Il est plus important de les implanter à des endroits stratégiques, car leur organisation dans l'espace est plus importante que la densité d'ouvrages (Viel *et al.*, 2014).

L'étude a montré que, pour les flux diffus et pour réduire les pertes en terre, les haies de 6 rangs, les bandes de miscanthus de 10 mètres de large et les fascines sont des ouvrages adéquats, ainsi que les bandes enherbées de 10 mètres, dans une moindre mesure. Pour réduire le débit de pointe à l'exutoire, la fascine et les bandes de miscanthus (10 m) fonctionnent bien, ainsi que la haie en 6 rangs. Pour les flux concentrés, les pertes en terre sont réduites par les haies en 6 rangs et les fascines, alors que le débit de pointe peut être réduit par des fascines et des bandes de miscanthus de 10 mètres de large. Qui plus est, l'enherbement du talweg et/ou des fossés présents est une autre piste de solution.

Etant donné le choix des dispositifs, une analyse des points forts et faibles de chaque ouvrage a été présentée, celle-ci tient compte de l'aspect hydraulique des ouvrages, de la durée de vie, de l'efficacité immédiate, de l'emprise au sol, de la valorisation possible et des capacités à favoriser la biodiversité. Cependant, l'aspect financier des ouvrages (mise en place et entretien) n'a pas été pris en compte dans ce travail.

Bien que les deux bassins versants testés aient été aménagés avec des densités de linéaires importantes, il n'en résulte pas moins que l'hydraulique douce ne peut pas, à elle seule, résoudre la problématique des coulées d'eau boueuse, du moins pour des  v nements pluvieux intenses (orages). C'est pourquoi celle-ci doit être accompagnée de mesures telles que le changement des techniques culturelles ou de la gestion des fossés. Si le risque résiduel, après la mise en œuvre de ces mesures complémentaires, est jugé encore trop important, la construction des bassins de rétention peut s'imposer pour protéger des zones sensibles en aval.

Enfin, ce travail ouvre des perspectives. Sur base de l'arbre de décision qui a été construit, un script pourrait être crée pour déterminer *a priori* et de façon objective les localisations et les propositions d'aménagement possibles. La carte crée par ce script serait une base de discussion pour les acteurs du territoire (agriculteurs, élus, commune, riverains). De plus, des mesures de terrain sur des bassins versants pourraient être envisagées afin de mieux calibrer le modèle selon les caractéristiques du bassin versant et de la pluie. En effet, ce travail a mis en évidence l'influence de paramètres sur les sorties du modèle, comme le facteur de calibration de ψ , la conductivité à saturation (K_{sat}) et le coefficient de Manning (n). En outre, l'effet de l'événement pluvieux est à tester lors de prochaines simulations, ainsi que la simulation de deux  v nements pluvieux ayant lieu à quelques heures ou jours

d'intervalle. Cette simulation permettrait de mettre en évidence la capacité de stockage des fascines et les éventuels problèmes pouvant en découler lorsque celles-ci débordent.

Références bibliographiques

- Agreste (2015). Mémento de la statistique agricole en Alsace par le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF) [en ligne]. Disponible sur : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R4215C02.pdf> (consultée le 28 avril 2017)
- ARAA (2012). Référentiel régional pédologique de la région Alsace à l'échelle 1/250000 : notice simplifiée [en ligne]. Disponible sur : https://www.araa-agronomie.org/download/get/notice_referentiel_regional_pedologique_alsace/85.html (consulté le 01/06/2017)
- Blanco-Canqui, H., Gantzer, C. J., Anderson, S. H., Alberts, E. E., & Thompson, A. L. (2004). Grass barrier and vegetative filter strip effectiveness in reducing runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus loss. *Soil Science Society of America Journal*, 68(5), 1670-1678.
- Bernoux, M., Chenu, C., Blanchart, E., Eglin, T., Bispo, A., Bardy, M., & King, D. (2011). Le programme GESSOL 2: Impact des pratiques agricoles sur les matières organiques et les fonctions des sols. *Etude et Gestion des sols*, 18(3), 137-145.
- Corpen (2007). Les fonctions environnementales des zones tampons, Les bases scientifiques et techniques des fonctions de protection des eaux et annexes, *Corpen*, 75 p et 101 p.
- Cugnière C. (2017). Conseillère érosion (Chambre d'agriculture d'Alsace)
- Derancourt, F. (1995). Erosion des terres agricoles, méthodologie proposée à l'étude de bassins versants agricoles. Rapport Chambre d'Agriculture Pas-de-Calais.
- Dernières nouvelles d'Alsace (2009). Mise en place de fascine [en ligne]. 13 mai 2009. Disponible sur : http://sitemap.dna.fr/articles/200905/13/mise-en-place-de-fascines_strasbourg_000005924.php (consultée le 12 juin 2017)
- De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., & Ritsema, C. J. (1996a). LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output. *Hydrological processes*, 10(8), 1107-1117.
- De Roo, A. P. J., Offermans, R. J. E., & Cremers, N. H. D. T. (1996b). LISEM: A single-event, physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II: Sensitivity analysis, validation and application. *Hydrological processes*, 10(8), 1119-1126.
- Duchemin, M., & Majdoub, R. (2004). Les bandes végétales filtrantes : de la parcelle au bassin versant. *Vecteur Environnement*, 37(2), 36-50.
- Dumas, D. (2009). Optimisation des micro-ouvrages de lutte contre les coulées d'eaux boueuses par la modélisation. Mémoire de fin d'études. Géosciences, environnement, risques. Strasbourg : Université de Strasbourg, ENGEES, 107 p.
- Friconnet, B. (2016). Ruissellement érosif et efficacité de différents dispositifs d'hydraulique douce pour lutter contre les coulées d'eau boueuse dans le Bas-Rhin (67). Mémoire de fin d'études. Géographie et sciences des territoires. Paris : Université Paris Diderot Paris VII, 111 p.
- Gabor, T.S., North, A. K., Ross, L. C. M., Murkin, H. R., Anderson, J. S., Turner, M.A. (2001). Buffer Strips. In: *Beyond the Pipe : The Importance of Wetlands & Uplands Conservation Practices in Watersheds Management: functions & values for water quality & quantity*. Ducks Unlimited Canada : 29-33 [en ligne] <http://www.ducks.ca/news/pdf/pipeshrt.pdf>

- Gauthier, G., Somer, L. (2013). Guide pratique de la culture de miscanthus [en ligne]. Septembre 2013. Disponible sur : <http://www.valbiom.be/files/library/Docs/Miscanthus/Guide-pratique-de-la-culture-de-miscanthus-2013.pdf>
- Gilbert, J. M., Franc, A. (1997). Typologie et cartographie du climat moyen dans la moitié nord de la France-Perspectives d'utilisation en relations milieu-production forestière. *Ingénieries-EAT*, (12), p-35.
- Gilley, J.E., Eghball, B., Kramer, L.A., Moorman, T.B. (2000). Narrow grass hedge effects on runoff and soil loss. *Journal of Soil and Water Conservation* **55**(2): 190–196.
- Gillijns, K., Govers, G., Poesen, J., & Mathijs, E. (2005). Erosion des sols en Belgique-Etat de la question. Technical report, Institut royal pour la Gestion durable des Ressources naturelles et la Promotion des Technologies propres, ASBL.
- Gouvernement premier ministre [FR] (2014). Registre parcellaire graphique 2012 : contour des îlots cultureux et leur groupe de cultures majoritaire des exploitations pour le département du Bas-Rhin (67) et du Haut-Rhin (68). 13 février 2014. Disponible sur : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-2012-contours-des-ilots-cultureux-et-leur-groupe-de-cultures-majorita/> (consulté le 12 juin 2017)
- Govers, G., Everaert, W., Poesen, J., Raws, G, De Ploey, J. (1987) : Susceptibilité d'un sol limoneux à l'érosion par rigoles : essais dans le Grand Canal de Caen, *Bulletin du centre de géomorphologie de Caen*, 33.
- Gril, J.-J., Bonnet, F., Clostre, F., Cohu, K., Dubois de la Sablonnière, F., Duclay, E., Guyot, C., Javelle, A., Nathalie, J., Laucher, S., Maillet-Mézeray, J., Nivon, C., Ouvry, J.-F., Pons, N., Pinay, G., Pommaret, E, Tournebize, J.(2007). Les fonctions environnementales des zones tampons — Les bases scientifiques et techniques des fonctions de protection des eaux, 1st ed., Tech. rep., Ministère du développement durable /CORPEN /groupezones tampons; Paris [en ligne] http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_fonctions_environn_zones_temp_bd.pdf
- Irstea (2014). Intégration des zones tampons dans le bassin versant – fiche n°9 : dispositifs de type fossé végétalisé et fossé à redents. Disponible sur : http://zonestampons.onema.fr/system/files/fiche_9_0.pdf (consulté le 25 juillet 2017)
- Jacod, A. (2008). Valorisation d'un modèle numérique de terrain haute résolution pour la modélisation des transferts dans un petit bassin versant. Mémoire de stage Master 2, ENGEES, Conseil Général du Haut-Rhin, ARAA, 51 p.
- Jetten, V., van den Bout, B. (2017). Limburg soil erosion model v3.9x : documentation and user manual. *University of twente*. 86p.
- Jetten V. (2017). Docteur en géographie physique (Faculté ITC Twente University, Université d'Utrecht, Pays-Bas)
- Kim, P.S., Kabaluapa, N.K., Yoo, K.H., Shannon, D.A., Wood, C.W. (2008). Alley cropping and terracing effects on surface runoff, soil erosion and loss of plant nutrients. *Journal of Environmental Hydrology* **16**(1): 1 – 15.
- Kwaad, F. J. P. M., & Rickson, R. J. (1994). A splash delivery ratio to characterize soil erosion events. *Conserving soil resources. European Perspectives*, 264-272.

- Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C., & Daroussin, J. (2002). L'érosion hydrique des sols en France. *Rapport INRA, IFEN*.
- Le Bissonnais, Y., Lecomte, V., & Cerdan, O. (2004). Grass strip effects on runoff and soil loss. *Agronomie*, 24(3), 129-136.
- Lebreton-Thaler, A. (2001). Guide des sols d'Alsace-Petite région naturelle N 05 : Collines de Brumath, du Kochersberg et de l'arrière Kochersberg. *Région Alsace*.
- Lefrancq, M., van Dijk, P., Jetten, V., Schwob, M., & Payraudeau, S. (2017). Improving runoff prediction using agronomical information in a cropped, loess covered catchment. *Hydrological Processes*, 31(6), 1408-1423.
- Legifrance (2015). Arrêté du 24 avril 2015 relatif aux règles de bonnes conditions agricoles et environnementales (BCAE) [en ligne]. Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000030555873&dateTexte=20170615> (consulté le 14 juin 2017)
- Legifrance (2016). Arrêté du 26 juillet 2016 portant reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle [en ligne]. Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2016/7/26/INTE1620877A/jo/texte> (consulté le 24 juillet 2017)
- Masson, S. (2011). Comparaison des paramètres physiques de la surface du sol au printemps en fonction des techniques culturales. Rapport de stage. ARAA. 19 p.
- McGregor, C.K., Debney, S.M., Johnson, J.R. (1999). Runoff and soil loss from cotton plots with and without stiff-grass hedges. *Transactions of the ASAE* 42(2) : 361–368.
- Météo France : climat de la région Alsace [en ligne]. Disponible sur : <http://www.meteofrance.com/climat/france/alsace/regi42/normales#> (consultée le 12 juin 2017)
- Meyer, L.D., Dabney, S.M., Harman, W.C. (1995). Sediment trapping effectiveness of stiff-grass hedges. *Transactions of the ASAE* 38(3) : 809–815.
- Michael R. (2017). Conseiller érosion (Chambre d'agriculture d'Alsace)
- Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (2015). Domaine « environnement, changement climatique et bonnes conditions agricoles des terres » : bande tampon le long des cours d'eau. Disponible sur : https://www1.telepac.agriculture.gouv.fr/telepac/pdf/conditionnalite/2015/technique/Conditionnalite-2015_fiche-technique_BCAE.pdf (consulté le 14 juin 2017)
- Morgantini, J., & Joliet, V. (2005). La biodiversité facteur de production. *Pour une agriculture qui*.
- Nicklown, J. W., Boulos, P. F., & Muleta, M. K. (2006). *Comprehensive urban hydrologic modeling handbook for engineers and planners*. MWH Soft, Incorporated.
- Oldeman, L. R., Hakkeling, R. U., & Sombroek, W. G. (1990). *World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note*. International Soil Reference and Information Centre.
- Ouvry, J. F., Le Bissonnais, Y., Martin, P., Bricard, O., & Souchere, V. (2010). Les couverts herbacés comme outils de réduction des pertes en terre par érosion hydrique. *Fourrages*, (202), 103-110.

- Ouvry, J. F., Richet, J. B., Bricard, O., Lheriteau, M., Bouzid, M., & Saunier, M. (2012). Fascines et Haies pour réduire les effets du ruissellement érosif : Caractérisation de l'efficacité et conditions d'utilisation ; synthèse des résultats. *Brochure Areas*.
- Ouvry, J.F. (2015). Aménagements sur le bassin versant, partage d'expériences sur le pays de Caux : aménagements de zones tampons en bordure des champs et sur le chemin de l'eau [en ligne]. 6 janvier 2015. Disponible sur : <http://www.greenotec.be/medias/files/greenotec-ifo2-zones-tampons.pdf> (consultée le 29 juillet 2017)
- Party, J. P. (2001). Guide des sols d'Alsace-Petite région naturelle N 11 : Sundgau et Jura Alsacien. *Région Alsace*.
- Party, J. P., Sauter, J., Burtin, M. L., & Koller, R. (1999). Guide des Sols d'Alsace : Petite Région Naturelle Plaine Sud-Alsace. *Région Alsace*.
- Phillips, J.D. (1989). Predicting minimum achievable soil loss in developing countries. *Applied Geography*, 9, 219-236.
- Poesen, J., Govers, G., 1994. Bodemerosie in Midden-België. Een stand van zaken. *Onze Alma Mater*, 48 (3): 251-267.
- Préfecture du Bas-Rhin (2014). Liste des arrêtés de catastrophes naturelles pour la commune d'Eckwersheim [en ligne]. 11 avril 2014. Disponible sur : [http://www.bas-rhin.gouv.fr/content/download/10764/72107/file/arretes de catastrophes naturelles d eckwersheim.pdf](http://www.bas-rhin.gouv.fr/content/download/10764/72107/file/arretes%20de%20catastrophes%20naturelles%20d%20eckwersheim.pdf) (consulté le 12 juin 2017)
- Profil environnemental de l'Alsace. Contexte et dynamiques régionales : géographie et climat [en ligne]. Disponible sur : [http://www.per.alsace.developpement-durable.gouv.fr/accueil/contexte et dynamiques regionales/geographie et climat](http://www.per.alsace.developpement-durable.gouv.fr/accueil/contexte%20et%20dynamiques%20regionales/geographie%20et%20climat) (consultée le 1er août 2017)
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. (1989). Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: Morel-Seytoux, H.J. Ed., *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling—Theory and Practice*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 275–300.
- Rey, F. (2004). Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(9), 1161-1169.
- Richet, J.-B., Ouvry, J.F., & Saunier, M. (2014). Haies herbacées anti-érosives : intérêt, faisabilité, efficacité en Haute-Normandie. *Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols (AREAS)*.
- Richet, J. B., Ouvry, J. F., & Saunier, M. (2016). The role of vegetative barriers such as fascines and dense shrub hedges in catchment management to reduce runoff and erosion effects: Experimental evidence of efficiency, and conditions of use. *Ecological Engineering*.
- Seitz, S., Goebes, P., Song, Z., Wittwer, R., van der Heijden, M., & Scholten, T. (2015, April). Soil erosion measurements under organic and conventional land use treatments and different tillage systems using micro-scale runoff plots and a portable rainfall simulator. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 17).
- SIDESA (2017). Coefficient de ruissellement [en ligne]. 13 janvier 2012, mis à jour le 12 février 2016. Disponible sur : <https://www.sidesa.fr/tous-les-articles/eaux-et-milieus-aquatiques/inondations-ruissellement/coefficient-de-ruissellement> (consultée le 3 août 2017)

- Soltner, D. (2001). *Bandes enherbées et autres dispositifs bocagers : pour garder les sols et filtrer l'eau, pour héberger la faune sauvage, pour maintenir les paysages*. Bressuire: Sciences et techniques agricoles.
- Spatz, R., Walker, F., Hurle, K. (1997). Effect of grass buffer strips on pesticide runoff under simulated rainfall. *Med. Fac. Landbouww Univ.Gent*, 62, 799–806.
- Staquet J.B. (2017). Ingénieur de projets et Assistant de recherche (Université catholique de Louvain, Belgique)
- Syndicat mixte des bassins versant de la pointe de Caux : Techniques d'hydraulique douce [en ligne]. Disponible sur : http://www.smbv-pointedecaux.fr/web/techniques_d_hydraulique_douce.html (consultée le 29 juillet 2017)
- University of Twente. Openlisem : a spatial model for runoff, floods and erosion [en ligne]. Disponible sur : <http://blogs.itc.nl/lisem/> (consulté le 21 mars 2017)
- Van-Camp, L., Bujarrabal, B., Gentile, A-R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazabal, C., Selvaradou, S-K. (2004) : Reports of the technical working groups established under the thematic strategy for soil protection, EUR 21319 EN/2, Office for Official Publications of the European communities, Luxembourg, 872p.
- Vandaele K. (2017). Docteur en géographie physique (Watering van Sint-Truiden, Belgique)
- van Dijk P. (2017). Docteur en géographie physique (ARAA)
- van Dijk, P. M., Kwaad, F. J. P. M., & Klapwijk, M. (1996). Retention of water and sediment by grass strips. *Hydrological processes*, 10(8), 1069-1080.
- van Dijk, P., Koller, R., Lasserre, D., Gaudillat, D. (2008). Rapport de l'impact du non labour sur la quantité et la qualité du ruissellement et de la production végétale (campagne 2008 sur le site de Geispitzen), ARAA.
- van Dijk, P., 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. In : Actes des 10èmes Journées d'Etude des Sols, 11 au 15 mai 2009, Strasbourg (Schwartz, D., ed.), 369-370.
- van Dijk, P., Koller, R., Lasserre, D. (2013). Alsace : le non labour limite les risques de fuites de phytos en maïs. *Perspectives agricoles*, 399(4), 36-38.
- van Dijk, P., Koller, R. (2015). Ruissellement et érosion des sols en Alsace : ampleur, évolution et leviers d'action agronomiques. Association pour la relance agronomique en Alsace. 14p.
- van Dijk, P., Rosenfelder, C., Scheurer, O., Duparque, A., Martin, P., Sauter, J. (2016). Une approche agronomique territoriale pour lutter contre le ruissellement et l'érosion des sols en Alsace. *Agronomie, Environment & Sociétés*, vol. 6, n°1, 35- 47.
- Van Pelt, R. S., Hushmurodov, S. X., Baumhardt, R. L., Chappell, A., Nearing, M. A., Polyakov, V. O., & Strack, J. E. (2017). The reduction of partitioned wind and water erosion by conservation agriculture. *Catena*, 148, 160-167.
- Viel, V., Delahaye, D., & Reulier, R. (2014). Impact de l'organisation des structures paysagères sur les dynamiques de ruissellement de surface en domaine bocager. Etude comparée de 3 petits bassins versants bas-normands. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 20(2), 175-188.

- Wesseling, C. G., Karssenber, D., Burrough, P. A., and van Deursen, W. P. A.: Integrating dynamic environmental models in GIS: The development of a Dynamic Modelling language, *Transactions in GIS* 1(1), 40-48, 1996
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning, *USDA Handbook*, 537, 58p.
- Yuan, Y., Bingner, R. L., & Locke, M. A. (2009). A review of effectiveness of vegetative buffers on sediment trapping in agricultural areas. *Ecohydrology*, 2(3), 321-336.

Annexes

Annexe I. Paramètres utilisés selon l'occupation du sol et de l'itinéraire technique pour le mois de mai

		stabilité agrégats	hauteur moyenne plantes	cohésion	cohésion additionnelle liée racines plantes	Leaf area index	Manning écoulement diffus	fraction surface couverte par résidus et végétatio n	rugosité aléatoire [cm]		Manning écoulement concentré		fraction cellule compactée
Occupation sol		AGGRSTA B	CH	COH	COHADD	LAI	N_diffus	PER	RR	cerpaille	N_concentré	facies _mai	crustfrc
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Friche	1	-1	0.25	1.5	1	0.8	0.3	0.6	0.7	0	0.3	-1	0
Prairie	2	-1	0.15	3	2	1.9	0.4	0.95	0.7	0	0.4	-1	0
Bande enherbée	3	-1	0.1	3.3	2	1.9	0.43	0.95	0.7	0	0.135	-1	0
Vergers	4	-1	0.1	2	1.5	11	0.4	0.95	0.7	0	0.4	-1	0
Forêt	5	-1	15	2	1.5	11	0.5	0.95	1.2	0	0.5	-1	0
Ripisylve boisée	6	-1	15	2	1.5	11	0.5	0.95	1.2	0	0.5	-1	0
Vigne	7	20	1.3	1	1	2	0.25	0.5	0.5	0	0.25	-1	0
Surface urbanisée	8	-1	0	50	0	0	0.015	0	0	0	0.015	-1	0
Jardin	9	-1	0.15	3	2	1.9	0.4	0.95	0.7	0	0.4	-1	0
Chemins de terre	10	-1	0	25	0	0	0.025	0	0.3	0	0.025	-1	0

Ripisylve avec bande enherbée	11	-1	15	2	1.5	11	0.5	0.95	1	0	0.5	-1	0
plan d'eau	13	-1	0	0.1	0	0	0.02	0	0	0	0.02	-1	0
Vigne enherbée	14	30	0.15	2	1.5	3	0.40	0.7	0.8	0	0.4	1	0.3
Vigne sans enherbement	15	15	1	1.25	0.5	1.2	0.15	0.3	0.5	0	0.15	1	0.5
Non labour maïs	20	20	0.01	0.9	0	0	0.149	0.25	0.99	0	0.149	0	0
Non labour céréale d'hiver	21	20	0.35	1.1	0.75	1.08	0.225	0.6	0.55	1	0.225	1	0.5
Non labour colza	22	20	0.25	0.9	0.75	0.8	0.166	0.5	0.66	1	0.166	1	0.5
Non labour tournesol	23	20	0.01	0.9	0	0	0.149	0.25	0.99	0	0.149	0	0
Non labour betterave	24	20	0.05	0.9	0.1	0.2	0.143	0.3	0.88	0	0.143	0	0
Non labour pomme de terre	25	20	0.1	0.9	0	0.2	0.117	0.35	0.66	0	0.11725	0	0
Non labour céréales d'été	26	20	0.2	0.9	0.3	0.5	0.178	0.3	0.88	1	0.178	0	0
Non labour soja	27	20	0.01	0.7	0	0	0.149	0.25	0.99	0	0.149	0	0
Semis direct maïs	30	30	0.01	1.4	0	0	0.152	0.4	0.72	0	0.152	0	0
Semis direct céréale d'hiver	31	30	0.35	1.8	0.75	1.08	0.23	0.7	0.4	1	0.23	1	0.5
Semis direct colza	32	30	0.25	1.4	0.75	0.8	0.168	0.6	0.48	1	0.168	0	0
Semis direct tournesol	33	30	0.01	1.4	0	0	0.152	0.4	0.72	0	0.152	0	0

Semis direct betterave	34	30	0.05	1.4	0.1	0.2	0.139	0.4	0.64	0	0.139	0	0
Semis direct pomme de terre	35	30	0.1	1.4	0	0.2	0.119	0.45	0.48	0	0.11925	0	0
Semis direct céréales d'été	36	30	0.2	1.4	0.3	0.5	0.184	0.45	0.64	1	0.184	0	0
Semis direct soja	37	30	0.01	1	0	0	0.152	0.4	0.72	0	0.152	0	0
Labour maïs	40	15	0	0.7	0	0	0.09	0	0.9	0	0.09	0	0
Labour céréale d'hiver	41	15	0.35	0.9	0.75	1.08	0.2	0.5	0.5	1	0.2	0	0
Labour colza	42	15	0.25	0.7	0.75	0.8	0.14	0.4	0.6	1	0.14	1	0.5
Labour tournesol	43	15	0	0.7	0	0	0.09	0	0.9	0	0.09	1	0.5
Labour betterave	44	15	0.05	0.7	0.1	0.2	0.095	0.1	0.8	0	0.095	1	0.5
Labour pomme de terre	45	15	0.1	0.7	0	0.2	0.068	0.15	0.6	0	0.0675	1	0.5
Labour céréales d'été	46	15	0.2	0.7	0.3	0.5	0.17	0.3	0.8	1	0.17	1	0.5
Labour soja	47	15	0	0.5	0	0	0.09	0	0.9	0	0.09	1	0.5
Routes	50	-1	0	50	0	0	0.02	0	0.1	0	0.015	-1	0
Mixte: forêt, verger, jardin, prairie	51	-1	3	2	1.5	11	0.40	0.95	0.7	0	0.4	-1	0
Sol nu	52	15	0	1.2	0	0	0.06	0	0.5	0	0.06	1	0.5
Terasses	60	-1	0	50	0	0	0.2	0.3	0	0	0.2	-1	0
Bande de miscanthus	70	-1	1.3	3.3	2	2.5	1.3	0.95	1.7	0	0.6	-1	0

Annexe II : Script

```
#! --iubin --matrixtable
#####
# PCRASTER script for the generation of a LISEM input database #
# Paul van Dijk and Helene Leduc 03/07/17 #
#####

Binding
#####
### input maps ###
#####
mask = maskbv1cut.map;
demori = bv1_mntssbar.map;
outlet = outlet.map; # location outlets and checkpoints
# land use map
occsol=bv1_ocstoutmais.map;
# road width map, not part of land use
roadwid=bv1_roadwidt.map;

# soil map
soils = bv1_ucs.map;

# Hydraulique douce: choose the right be, fasc, misc and haie
be=empty.map;
fasc=empty.map;
haie=empty.map;
misc=empty.map;
# be=bv1_be_5m_fascine.map;
# be=bv1_be_10m_fascine.map;
# fasc=bv1_fascine_conc.map;
# fasc=bv1_fascine_diffus.map;
# haie=bv1_haie_conc.map;
# haie=bv1_haie_diffus.map;
# misc=bv1_miscanthus_5m_conc.map;
# misc=bv1_miscanthus_5m_diffus.map;
# misc=bv1_miscanthus_10m_conc.map;
# misc=bv1_miscanthus_10m_diffus.map;
# be=bv1_be_10m_all_diffus.map;
# be=bv1_be_5m_all_conc.map;
# be=bv1_be_5m_all_diffus.map;
# be=bv1_be_10m_all_conc.map;
# be=herbe_axe.map;

#####
### input tables ###
#####
# table with soil parameters for each soil type
solpar = soil_par1_2017_tetai02.tbl;
solpar2 = soil_par2_2017_tetai02.tbl;
# solpar table layout #
#-----#
```

```
#01 d50
#02 ksat1
#03 psi1
#04 soildep1
#05 thetai1
#06 thetas1
#07 stonefrc
```

```
# table with land use related parameters for each land use type
```

```
occsolpar = occsolpar_ldd.tbl;
```

```
# occsolpar table layout #
```

```
#-----#
```

```
#01 aggrstab
```

```
#02 ch
```

```
#03 coh
```

```
#04 cohadd
```

```
#05 lai
```

```
#06 n
```

```
#07 per
```

```
#08 rr
```

```
#09 cerpaille
```

```
# table with factor accounting for tillage and rainfall on matrix porosity and Ksat
```

```
facieslut = facies_fact.lut;
```

```
# table with crusts fraction and ksat crusts
```

```
crustlut = crusts.lut;
```

```
#####
```

```
### input constants ###
```

```
#####
```

```
Soildepth = 1500;
```

```
Chancoh = 200;
```

```
Chanman = 0.03;
```

```
Chanside = 0;
```

```
Chanwidth = 1;
```

```
Chandepth = 0.3;
```

```
Changrad = 0.015;
```

```
chanupstrha = 78; # ha
```

```
concfowupstha = 5; # ha
```

```
largeur_haie = 0.8; # m
```

```
ksat_be = 90; #mm/h
```

```
ksat_misc = 70; #mm/h
```

```
ksat_fasc = 35 ; #mm/h
```

```
ksat_haie = 400; #mm/h
```

```
#####
```

```
### output maps ###
```

```
#####
```

```
# basic topography related maps
```

```
dem = dem.map;
```

```
lddcatch=ldd.map;
area = area.map; # reference map for Lisem
gradtopo = gradtopo.map; # max slope
grad = grad.map;
id = id.map; # pluviograph influence zones

accu=accu.map;
concfline=concfline.map;
concfzone=concfzone.map;
# mask for channel maps
chanmask = chanmask.map;

# nonerodible surfaces
hardsurf = hardsurf.map;

# crop maps
coverc=per.map;
cerpaille=cerpaille.map;
covercerpaille=per2.map;
lai=lai.map;
cropheight=ch.map;
grass=grasswid.map;

# soil maps
ksatold=ksat1_old.map;
ksat=ksat1.map;
psi=psi1.map;
pore=thetas1.map;
thetai=thetai1.map;
soildep=soildep1.map;

# maps for G&A 2nd layer
ksat2=ksat2.map;
psi2=psi2.map;
pore2=thetas2.map;
thetai2=thetai2.map;
soildep2=soildep2.map;

# surface maps
rr=rr.map;
mann=n.map;
stone=stonefrfc.map; # crusted fraction, only used when option chosen in LISEM
crust=crustfrfc.map;
comp=compfrfc.map;

# erosion maps
cohsoil = coh.map;
cohplant = cohadd.map;
D50 = d50.map;
aggrstab = aggrstab.map;

# channel maps
```



```

Iddchan = Iddchan.map;
chanwidth = chanwidth.map;
changrad = changrad.map;
chanman = chanman.map;
chanside = chanside.map;
chancoh = chancoh.map;

# ks maps
matrice = Ks_matrice.map;
facteur = fact_mai.map;

#facteur = fact_juin.map;
facies = facies_mai.map;

#facies = facies_juin.map;
topsoil = Ks_tops_mai.map ;

#topsoil = ks_tops_juin.map;
subsoil = Ksat_sub.map;
ksatcrst = Ksatcrst.map;
ksatfinal = ksatfinal.map;

# ks haie
ksatgras = ksatgras.map; #haie
grasswid = grasswid.map; # haie

#Fascine
#ksatfascine = ksatfascine.map;
#nfascine = nfascine.map;
areamap

# MASK
mask;

initial

#####
### BASE MAPS ###
#####
demtmp=demori*mask;
report Iddcatch=Iddcreate(demtmp,1e32,1e32,1e32,1e32);
report outlet=pit(Iddcatch);
dist_outlet=spread(outlet,0,1);
report flowboundary.map=boolean(if(dist_outlet lt 120,1,0));
report outpoint.map=outlet;
report catchment.map=subcatchment(Iddcatch,outlet);
report accu=accuflux(Iddcatch,cellarea()/10000); # ha

report conflowline = scalar(if(accu gt conflowupstha,1,0));
conflowzonetmp = windowaverage(conflowline,20);
report conflowzone = if(conflowzonetmp gt 0.2, 0.2, conflowzonetmp);
report dem=demtmp; #-conflowzone;

```

```
# reference catchment boundaries, based on watershed from outlet
report area = boolean(mask);
# sine gradient (-), make sure slope > 0.001
report gradtopo = max(sin(atan(slope(demttmp))),0.001);
report grad = mask*(cover(max(sin(atan(gradtopo)),0.001),gradtopo));
```

```
#####
### MAPS WITH RAINFALL INFLUENCE ZONE ###
#####
report id = nominal(scalar(area)*mask);
```

```
#####
### modify ocs if needed for erosion control measures ###
#####
occsolpar=scalar(occsol);
occsoltmp1=mask*cover(if(be gt 0,3),occsolpar);
occsol=nominal(cover(if(misc gt 0,70),occsoltmp1));
report landunit.map=occsol;
```

```
#####
### CROP MAPS ###
#####
# fraction soil cover (including residue)
report coverc = lookupscalar(occsolpar, 7, occsol) * mask;
report cerpaille = lookupscalar(occsolpar, 9, occsol) * mask;
report covercerpaille = coverc * cerpaille;
```

```
# crop height (m)
report cropheight = lookupscalar(occsolpar, 2, occsol) * mask;
```

```
# LAI (m2/m2)
report lai = lookupscalar(occsolpar, 5, occsol) * mask;
```

```
#####
### INFILTRATION MAPS for option two layer GREEN & AMPT ###
#####
report pore = lookupscalar(solpar, 6, soils) * mask;
report psi = abs(lookupscalar(solpar, 3, soils)) * mask;
report thetai = lookupscalar(solpar, 5, soils) * mask;
report pore2 = lookupscalar(solpar2, 6, soils) * mask;
report psi2 = abs(lookupscalar(solpar2, 3, soils)) * mask;
report thetai2 = lookupscalar(solpar2, 5, soils) * mask;
```

```
#####
### SOIL SURFACE MAPS ###
#####
# micro relief, random roughness (=std dev in cm)
report rr = max(lookupscalar(occsolpar, 8, occsol) * mask,0.01);
```

```
# Manning's n (-)
# take from table
```

```
report mann = lookupscalar(occsolpar, 6, occsol) * mask;
#manntmp = if(concflowzone.map eq 0,lookupscalar(occsolpar, 6, occsol),lookupscalar(occsolpar,10,
occsol)*0.9) * mask; #manning diffus colonne 6, manning concentré colonne 10
#report mann = if(((concflowzone.map gt 0) and ((scalar(occsol) ge 20) and (scalar(occsol) lt
50))),manntmp,manntmp);
#report mann = cover(if(fascine eq 1, 2), mann_old);
```

```
# stone fraction
report stone = lookupscalar(solpar, 7, soils) * mask;
```

```
# fraction compacted, hardsurface, roads
report comp = mask*0;
report hardsurf=scalar(if((occsol eq 8) or (occsol eq 50) or (occsol eq 10) or (occsol eq 13), 1,0));
report roadwidt.map=roadwidt*mask;
```

```
#####
### EROSION MAPS ###
#####
report D50 = lookupscalar(solpar, 1, soils) * mask;
report d90.map = 4*D50;
report cohsoil = lookupscalar(occsolpar, 3, occsol) * mask;
report cohplant = lookupscalar(occsolpar, 4, occsol) * mask;
report agrstap = lookupscalar(occsolpar, 1, occsol) * mask;
```

```
#####
### CHANNEL MAPS ###
#####
#report lddchan=lddcreate(dem*chanmask,1e20,1e20,1e20,1e20);
report chanmask = boolean(if(accu gt chanupstrha,1,0));
chanmask2=scalar(chanmask);
report lddchan=if((mask gt 0) and (chanmask2 gt 0),lddcatch);
report changrad=mask*chanmask2*scalar(Changrad);
report chancoh=mask*chanmask2*scalar(Chancoh);
report chanman=mask*chanmask2*scalar(Chanman);
report chanside=mask*chanmask2*scalar(Chanside);
report chanwidth=mask*chanmask2*scalar(Chanwidth);
report chandepth.map=mask*chanmask2*scalar(Chandepth);
report floodzone.map=boolean(if(windowaverage(scalar(chanmask),50) gt 0,1,0));
report chanmaxq.map=mask*0;
```

```
#####
### Ks MAPS ###
#####
report matrice = lookupscalar(solpar, 2, soils) * mask;
# facteur et facies mai
report facteur =lookupscalar(facieslut,2,occsol);
report facies =lookupscalar(facieslut,1,occsol);
# facteur et facies juin
#report facteur =lookupscalar(facieslut,4,occsol);
#report facies =lookupscalar(facieslut,3,occsol);
report soildep =lookupscalar(facieslut,5,occsol);
```

```

report soildep2 =lookupscalar(facieslut,6,occsol);

# landuse with poreus subsoil
report opensubsoil.map = boolean((if(scalar(occsol) eq 3 or scalar(occsol) eq 5,1,0)));
report topsoil = facteur * matrice;
report subsoil =if(opensubsoil.map,matrice*3,matrice*1.5);
report ksatold=topsoil;
report ksat2=subsoil;

ksatold2=if(covercerpaille le 0.6, ksatold + covercerpaille * 1.67 * ksatold, 2 * ksatold);

report ksatcrst.map=lookupscalar(crustlut,2,faeries);
report crustfrc.map=lookupscalar(crustlut,1,faeries);
report ksat = cover(if(be gt 0, ksat_be),if(fasc gt 0, ksat_fasc),if(misc gt 0, ksat_misc),ksatold2);
report ksatgras=cover(if(haie gt 0, ksat_haie),0*mask);
report grasswid=cover(if(haie gt 0, largeur_haie),0*mask);
#! --lddin --matrixtable
#####
# PCRASTER script for the generation of a LISEM input database #
# Paul van Dijk and Helene Leduc 03/07/17 #
#####

Binding
#####
### input maps ###
#####
mask = maskbv1cut.map;
demori = bv1_mntssbar.map;
outlet = outlet.map; # location outlets and checkpoints
# land use map
occsol=bv1_ocstoutmais.map;
# road width map, not part of land use
roadwid=bv1_roadwidt.map;

# soil map
soils = bv1_ucs.map;

# Hydraulique douce: choose the right be, fasc, misc and haie
be=empty.map;
fasc=empty.map;
haie=empty.map;
misc=empty.map;
# be=bv1_be_5m_fascine.map;
# be=bv1_be_10m_fascine.map;
# fasc=bv1_fascine_conc.map;
# fasc=bv1_fascine_diffus.map;
# haie=bv1_haie_conc.map;
# haie=bv1_haie_diffus.map;
# misc=bv1_miscanthus_5m_conc.map;
# misc=bv1_miscanthus_5m_diffus.map;
# misc=bv1_miscanthus_10m_conc.map;
# misc=bv1_miscanthus_10m_diffus.map;

```

```
# be=bv1_be_10m_all_diffus.map;
# be=bv1_be_5m_all_conc.map;
# be=bv1_be_5m_all_diffus.map;
# be=bv1_be_10m_all_conc.map;
# be=herbe_axe.map;
```

```
#####
```

```
### input tables ###
```

```
#####
```

```
# table with soil parameters for each soil type
```

```
solpar = soil_par1_2017_tetai02.tbl;
```

```
solpar2 = soil_par2_2017_tetai02.tbl;
```

```
# solpar table layout #
```

```
#-----#
```

```
#01 d50
```

```
#02 ksat1
```

```
#03 psi1
```

```
#04 soildep1
```

```
#05 thetai1
```

```
#06 thetas1
```

```
#07 stonefrc
```

```
# table with land use related parameters for each land use type
```

```
occsolpar = occsolpar_ldd.tbl;
```

```
# occsolpar table layout #
```

```
#-----#
```

```
#01 aggrstab
```

```
#02 ch
```

```
#03 coh
```

```
#04 cohadd
```

```
#05 lai
```

```
#06 n
```

```
#07 per
```

```
#08 rr
```

```
#09 cerpaille
```

```
# table with factor accounting for tillage and rainfall on matrix porosity and Ksat
```

```
facieslut = facies_fact.lut;
```

```
# table with crusts fraction and ksat crusts
```

```
crustlut = crusts.lut;
```

```
#####
```

```
### input constants ###
```

```
#####
```

```
Soildepth = 1500;
```

```
Chancoh = 200;
```

```
Chanman = 0.03;
```

```
Chanside = 0;
```

```
Chanwidth = 1;
```

```
Chandepth = 0.3;
```

```
Changrad = 0.015;
```

```
chanupstrha = 78; # ha
concfowupstha = 5; # ha
largeur_haie = 0.8; # m
ksat_be = 90; #mm/h
ksat_misc = 70; #mm/h
ksat_fasc = 35 ; #mm/h
ksat_haie = 400; #mm/h
```

```
#####
### output maps ###
#####
```

```
# basic topography related maps
dem = dem.map;
lddcatch=ldd.map;
area = area.map; # reference map for Lisem
gradtopo = gradtopo.map; # max slope
grad = grad.map;
id = id.map; # pluviograph influence zones
```

```
accu=accu.map;
concfowline=concfowline.map;
concfowzone=concfowzone.map;
# mask for channel maps
chanmask = chanmask.map;
```

```
# nonerodible surfaces
hardsurf = hardsurf.map;
```

```
# crop maps
coverc=per.map;
cerpaille=cerpaille.map;
covercerpaille=per2.map;
lai=lai.map;
cropheight=ch.map;
grass=grasswid.map;
```

```
# soil maps
ksatold=ksat1_old.map;
ksat=ksat1.map;
psi=psi1.map;
pore=thetas1.map;
thetai=thetai1.map;
soildep=soildep1.map;
```

```
# maps for G&A 2nd layer
ksat2=ksat2.map;
psi2=psi2.map;
pore2=thetas2.map;
thetai2=thetai2.map;
soildep2=soildep2.map;
```

```
# surface maps
rr=rr.map;
mann=n.map;
stone=stonefrc.map; # crusted fraction, only used when option chosen in LISEM
crust=crustfrc.map;
comp=compfrc.map;
```

```
# erosion maps
cohsoil = coh.map;
cohplant = cohadd.map;
D50 = d50.map;
aggrstab = aggrstab.map;
```

```
# channel maps
lddchan = lddchan.map;
chanwidth = chanwidt.map;
changrad = changrad.map;
chanman = chanman.map;
chanside = chanside.map;
chancoh = chancoh.map;
```

```
# ks maps
matrice = Ks_matrice.map;
facteur = fact_mai.map;
```

```
#facteur = fact_juin.map;
facies = facies_mai.map;
```

```
#facies = facies_juin.map;
topsoil = Ks_tops_mai.map ;
```

```
#topsoil = ks_tops_juin.map;
subsoil = Ksat_sub.map;
ksatcrst = Ksatcrst.map;
ksatfinal = ksatfinal.map;
```

```
# ks haie
ksatgras = ksatgras.map; #haie
grasswid = grasswid.map; # haie
```

```
#Fascine
#ksatfascine = ksatfascine.map;
#nfascine = nfascine.map;
areamap
```

```
# MASK
mask;
```

```
initial
```

```

#####
### BASE MAPS ###
#####
demtmp=demori*mask;
report lddcatch=lddcreate(demtmp,1e32,1e32,1e32,1e32);
report outlet=pit(lddcatch);
dist_outlet=spread(outlet,0,1);
report flowboundary.map=boolean(if(dist_outlet lt 120,1,0));
report outpoint.map=outlet;
report catchment.map=subcatchment(lddcatch,outlet);
report accu=accuflux(lddcatch,cellarea()/10000); # ha

report concflowline = scalar(if(accu gt concflowupstha,1,0));
concflowzonetmp = windowaverage(concflowline,20);
report concflowzone = if(concflowzonetmp gt 0.2, 0.2, concflowzonetmp);
report dem=demtmp; #-concflowzone;

# reference catchment boundaries, based on watershed from outlet
report area = boolean(mask);
# sine gradient (-), make sure slope > 0.001
report gradtopo = max(sin(atan(slope(demtmp))),0.001);
report grad = mask*(cover(max(sin(atan(gradtopo))),0.001),gradtopo));

#####
### MAPS WITH RAINFALL INFLUENCE ZONE ###
#####
report id = nominal(scalar(area)*mask);

#####
### modify ocs if needed for erosion control measures ###
#####
occsol=scalar(occsol);
occsoltmp1=mask*cover(if(be gt 0,3),occsol);
occsol=nominal(cover(if(misc gt 0,70),occsoltmp1));
report landunit.map=occsol;

#####
### CROP MAPS ###
#####
# fraction soil cover (including residue)
report coverc = lookupscalar(occsolpar, 7, occsol) * mask;
report cerpaille = lookupscalar(occsolpar, 9, occsol) * mask;
report covercerpaille = coverc * cerpaille;

# crop height (m)
report cropheight = lookupscalar(occsolpar, 2, occsol) * mask;

# LAI (m2/m2)
report lai = lookupscalar(occsolpar, 5, occsol) * mask;

#####
### INFILTRATION MAPS for option two layer GREEN & AMPT ###

```



```

#####
report pore = lookupscalar(solpar, 6, soils) * mask;
report psi = abs(lookupscalar(solpar, 3, soils)) * mask;
report thetai = lookupscalar(solpar, 5, soils) * mask;
report pore2 = lookupscalar(solpar2, 6, soils) * mask;
report psi2 = abs(lookupscalar(solpar2, 3, soils)) * mask;
report thetai2 = lookupscalar(solpar2, 5, soils) * mask;

#####
### SOIL SURFACE MAPS ###
#####
# micro relief, random roughness (=std dev in cm)
report rr = max(lookupscalar(occsolpar, 8, occsol) * mask,0.01);

# Manning's n (-)
# take from table
report mann = lookupscalar(occsolpar, 6, occsol) * mask;
#manntmp = if(concflowzone.map eq 0,lookupscalar(occsolpar, 6, occsol),lookupscalar(occsolpar,10,
occsol)*0.9) * mask; #manning diffus colonne 6, manning concentré colonne 10
#report mann = if(((concflowzone.map gt 0) and ((scalar(occsol) ge 20) and (scalar(occsol) lt
50))),manntmp,manntmp);
#report mann = cover(if(fascine eq 1, 2), mann_old);

# stone fraction
report stone = lookupscalar(solpar, 7, soils) * mask;

# fraction compacted, hardsurface, roads
report comp = mask*0;
report hardsurf=scalar(if((occsol eq 8) or (occsol eq 50) or (occsol eq 10) or (occsol eq 13), 1,0));
report roadwidt.map=roadwidt*mask;

#####
### EROSION MAPS ###
#####
report D50 = lookupscalar(solpar, 1, soils) * mask;
report d90.map = 4*D50;
report cohsoil = lookupscalar(occsolpar, 3, occsol) * mask;
report cohplant = lookupscalar(occsolpar, 4, occsol) * mask;
report aggrstab = lookupscalar(occsolpar, 1, occsol) * mask;

#####
### CHANNEL MAPS ###
#####

#report lddchan=lddcreate(dem*chanmask,1e20,1e20,1e20,1e20);
report chanmask = boolean(if(accu gt chanupstrha,1,0));
chanmask2=scalar(chanmask);
report lddchan=if((mask gt 0) and (chanmask2 gt 0),lddcatch);
report changrad=mask*chanmask2*scalar(Changrad);
report chansoh=mask*chanmask2*scalar(Chancoh);
report chanman=mask*chanmask2*scalar(Chanman);
report chanside=mask*chanmask2*scalar(Chanside);

```

```
report chanwidth=mask*chanmask2*scalar(Chanwidth);
report chandepth.map=mask*chanmask2*scalar(Chandepth);
report floodzone.map=boolean(if(windowaverage(scalar(chanmask),50) gt 0,1,0));
report chanmaxq.map=mask*0;
```

```
#####
```

```
### Ks MAPS ###
```

```
#####
```

```
report matrice = lookupscalar(solpar, 2, soils) * mask;
```

```
# facteur et facies mai
```

```
report facteur =lookupscalar(facieslut,2,occsol);
```

```
report facies =lookupscalar(facieslut,1,occsol);
```

```
# facteur et facies juin
```

```
#report facteur =lookupscalar(facieslut,4,occsol);
```

```
#report facies =lookupscalar(facieslut,3,occsol);
```

```
report soildep =lookupscalar(facieslut,5,occsol);
```

```
report soildep2 =lookupscalar(facieslut,6,occsol);
```

```
# landuse with poreus subsoil
```

```
report opensubsoil.map = boolean((if(scalar(occsol) eq 3 or scalar(occsol) eq 5,1,0)));
```

```
report topsoil = facteur * matrice;
```

```
report subsoil =if(opensubsoil.map,matrice*3,matrice*1.5);
```

```
report ksatold=topsoil;
```

```
report ksat2=subsoil;
```

```
ksatold2=if(covercerpaille le 0.6, ksatold + covercerpaille * 1.67 * ksatold, 2 * ksatold);
```

```
report ksatcrst.map=lookupscalar(crustlut,2,facies);
```

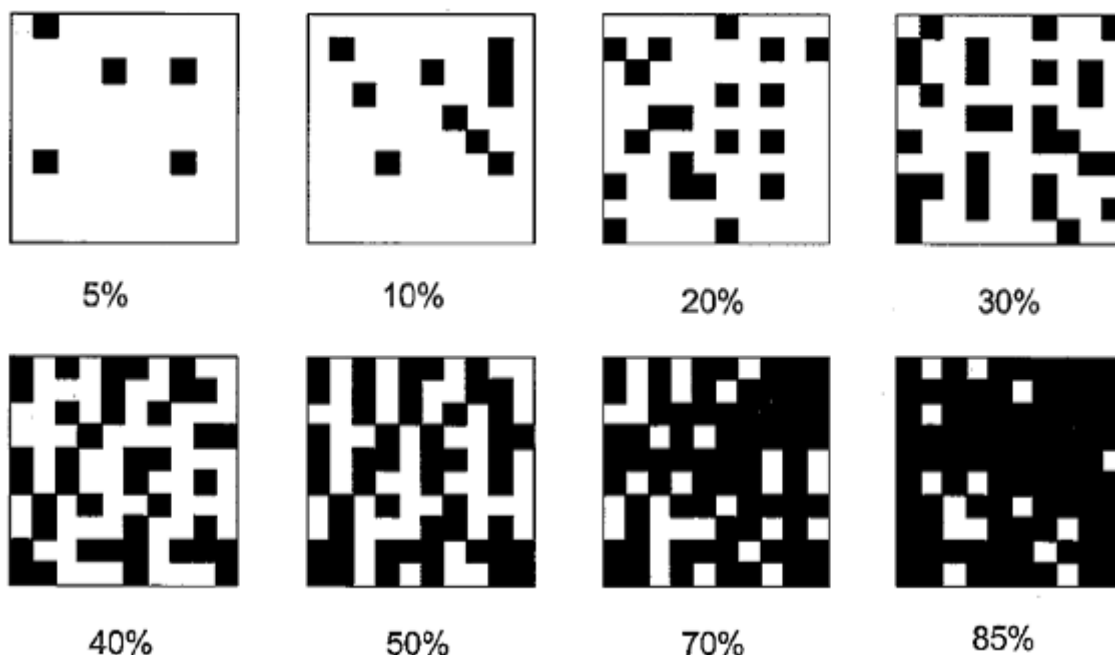
```
report crustfrc.map=lookupscalar(crustlut,1,facies);
```

```
report ksat = cover(if(be gt 0, ksat_be),if(fasc gt 0, ksat_fasc),if(misc gt 0, ksat_misc),ksatold2);
```

```
report ksatgras=cover(if(haie gt 0, ksat_haie),0*mask);
```

```
report grasswid=cover(if(haie gt 0, largeur_haie),0*mask);
```

Annexe III. Diagramme % végétation



Annexe IV. Paramètre du sol

	d50	ksat1 utilisé	psi1	soildep 1	thetai1	thetas1	Stone fraction
0	1	2	3	4	5	6	7
11239	25	10.45	17	270	0.2	0.51	0.02
11270	25	7.07	17	270	0.2	0.45	0
11271	25	8.35	17	270	0.2	0.46	0.15
11273	25	11.44	17	270	0.2	0.51	0
11275	25	6.84	17	270	0.2	0.46	0
11292	25	7.28	17	270	0.2	0.50	0
11293	25	7.04	17	270	0.2	0.49	0

Annexe V. % croute et Ksat croute

Facies	fraction cellule occupée par les croûtes	K sat des croûtes
0	1	2
0	0	0
1	0.4	8
2	0.7	4
-1	0	0

Annexe VI. Résultats des simulations avec *splash delivery ratio* = 0.01 et 0,5

Référence	<u>0.01</u>	<u>0.5</u>
LISEM results at time (min):,	149.83	149.83
Catchment area (ha):	85.66	85.66
Total Precipitation (mm):	35.03	35.03
Total infiltration (mm):	24.99	24.99
Surface storage (mm):	0.00115	0.00115
Water in overland flow (mm):	0.05	0.05
Water in flood (mm):	0.00	0.00
Water in channels (mm):	0.00	0.00
Total outflow (all flows) (mm):	9.99	9.99
Total channel+OF discharge (m3):	8523.84	8523.84
Peak time precipitation (min):	14.08	14.08
Peak discharge/Precipitation (%):	28.52	28.52
Splash detachment (land) (ton):	42.30	104.33
Flow detachment (land) (ton):	2630.88	2621.57
Deposition (land) (ton):	-1838.45	-1890.77
Total soil loss (ton):	834.72	834.73
Total channel+OF discharge (m3):	9744.97	9745.07
Peak discharge for outlet 0 (l/s):	7499.80	7499.80
Peak discharge for outlet 1 (l/s):	7499.80	7499.80
Peak time discharge for outlet 0 (min):	33.83	33.83
Peak time discharge for outlet 1 (min):	33.83	33.83

Annexe VII. Résultats des simulations pour facteur de calibration $\psi=0.01$ et $\psi=1.00$

Référence	<u>psi * 1.00</u>	<u>psi*0.01</u>	<u>teta i = teta sat</u>
LISEM results at time (min):,	149.83	149.83	149.83
Catchment area (ha):	85.66	85.66	85.66
Total Precipitation (mm):	35.03	35.03	35.03
Total infiltration (mm):	24.99	11.87	9.57
Surface storage (mm):	0.00115	0.00157	0.00088
Water in overland flow (mm):	0.05	0.11	0.01
Water in flood (mm):	0.00	0.00	0.00
Water in channels (mm):	0.00	0.00	0.00
Total outflow (all flows) (mm):	9.99	23.04	25.44
Total channel+OF discharge (m3):	8523.84	19665.47	21708.69
Total flood discharge (m3):	0.00	0.00	0.00
Total Tile discharge (m3):	0.00	0.00	0.00
Peak time precipitation (min):	14.08	14.08	14.08
Peak discharge/Precipitation (%):	28.52	65.79	72.63
Flood volume (max level) (m3):	0.00	0.00	0.00
Flood area (max level) (m2):	0.00	0.00	0.00
Splash detachment (land) (ton):	104.33	97.45	97.37
Flow detachment (land) (ton):	2621.57	5207.46	5208.12
Deposition (land) (ton):	-1890.77	-3003.08	-3043.99
Suspended Sediment (land) (ton):	0.39	0.14	0.01
Total soil loss (ton):	834.73	2301.69	2267.24
Average soil loss (kg/ha):	9745.07	26871.26	26469.03
Peak discharge for outlet 0 (l/s):	7499.80	18270.11	20211.81
Peak discharge for outlet 1 (l/s):	7499.80	18270.11	20211.81
Peak discharge for outlet 2 (l/s):	1826.03		3816.91
Peak discharge for outlet 3 (l/s):	4171.21		9484.51
Peak discharge for outlet 4 (l/s):	2195.83		4445.00
Peak discharge for outlet 5 (l/s):	7204.50		18288.96
Peak time discharge for outlet 0 (min):	33.83	28.00	28.08
Peak time discharge for outlet 1 (min):	33.83	28.00	28.08
Peak time discharge for outlet 2 (min):	25.50		22.17
Peak time discharge for outlet 3 (min):	28.33		24.25
Peak time discharge for outlet 4 (min):	23.83		21.25
Peak time discharge for outlet 5 (min):	31.50		26.08

Annexe VIII. Résultats des simulations pour le modèle 1D et 2D

	<u>2D</u>	<u>LDD</u>
LISEM run with:, reference.run		
LISEM results at time (min);, 449.833333333	449.83333	149.83333
Catchment area (ha):	85.6563734	85.6563734
Total Precipitation (mm):	35.0266667	35.0266667
Total interception (mm):	0	0
Total House interception (mm):	0	0
Total infiltration (mm):	30.307755	24.9875726
Surface storage (mm):	0.00022291	0.00114993
Water in overland flow (mm):	0.00510378	0.04956748
Total outflow (all flows) (mm):	4.71358495	9.98838155
Total channel+OF discharge (m3):	4022.45556	8523.83511
Peak time precipitation (min):	14.0833333	14.0833333
Peak discharge/Precipitation (%):	13.4571325	28.5165062
Splash detachment (land) (ton):	103.177296	104.326818
Flow detachment (land) (ton):	4609.87304	2621.56562
Deposition (land) (ton):	-	-
	4424.73035	1890.77266
Suspended Sediment (land) (ton):	0.79833584	0.3925118
Total soil loss (ton):	287.521652	834.727269
Average soil loss (kg/ha):	3356.6872	9745.069
Peak discharge for outlet 0 (l/s):	1539.50038	7499.80337
Peak discharge for outlet 1 (l/s):	346.232641	7499.80337
Peak discharge for outlet 2 (l/s):	362.119667	1826.03129
Peak discharge for outlet 3 (l/s):	38.6332918	4171.20803
Peak discharge for outlet 4 (l/s):	114.831654	2195.83053
Peak discharge for outlet 5 (l/s):	448.83343	7204.50204
Peak time discharge for outlet 0 (min):	26.1666667	33.8333333
Peak time discharge for outlet 1 (min):	26.8333333	33.8333333
Peak time discharge for outlet 2 (min):	23.3333333	25.5
Peak time discharge for outlet 3 (min):	70	28.3333333
Peak time discharge for outlet 4 (min):	24.25	23.8333333
Peak time discharge for outlet 5 (min):	26	31.5

Annexe IX. Tableau global résultats des simulations d'hydraulique douce à Eckwersheim pour les flux diffus

Variable	Reference version 4.01	be_diffus_5m	Bm_diffus_5m	haie_diffus_ 3lignes	fascine_diffus _5m	Be_diffus_10m	Bm_diffus_10m	haie_diffus_ 6lignes	fascine_diffus _10m
Total infiltration (mm):	24.99	25.25	25.39	25.41	25.34	25.36	25.54	25.66	25.51
Total outflow (all flows) (mm):	9.99	9.73	9.59	9.56	9.42	9.62	9.43	9.32	9.23
Flow detachment (land) (ton):	2621.57	2536.81	2568.88	2766.89	2758.84	2512.74	2543.89	2761.84	2730.46
Deposition (land) (ton):	-1890.77	-1827.75	-1876.63	-2107.88	-1971.07	-1812.38	-1866.00	-2135.18	-1946.87
Total soil loss (ton):	834.73	812.20	795.52	762.58	745.12	803.20	780.90	729.91	732.64
Average soil loss (kg/ha):	9745.07	9482.13	9287.35	8902.80	8699.00	9377.02	9116.66	8521.41	8553.19
Peak discharge for outlet 0 (l/s):	7499.80	7436.11	7096.69	7181.65	5974.25	7216.84	6775.99	6990.78	5840.48
Peak time precipitation (min):	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08
Peak time discharge for outlet 0 (min):	33.83	33.83	34.33	34.08	37.42	34.00	34.67	34.25	37.50
Peak discharge for outlet 1 (l/s):	7499.80	7436.11	7096.69	7181.65		7216.84	6775.99	6990.78	
Peak discharge for outlet 2 (l/s):	1826.03	1840.02	1733.40	1746.51		1758.73	1617.01	1712.69	
Peak discharge for outlet 3 (l/s):	4171.21	4167.03	3999.28	4016.70		4023.58	3774.80	3931.92	
Peak discharge for outlet 4 (l/s):	2195.83	2123.26	2092.28	2122.96		2128.23	2092.75	2095.69	
Peak discharge for outlet 5 (l/s):	7204.50	7161.38	6823.79	6922.22		6953.40	6511.51	6748.48	
Peak time discharge for outlet 1 (min):	33.83	33.83	34.33	34.08		34.00	34.67	34.25	
Peak time discharge for outlet 2 (min):	25.50	25.17	25.83	25.75		25.83	26.67	25.83	
Peak time discharge for outlet 3 (min):	28.33	28.17	28.67	28.58		28.58	29.25	28.67	
Peak time discharge for outlet 4 (min):	23.83	23.92	23.33	24.00		24.00	23.33	23.42	
Peak time discharge for outlet 5 (min):	31.50	31.42	32.00	31.75		31.67	32.25	31.83	
Total channel+OF discharge (m3):	8523.84	8299.87	8183.26	8162.30	8035.05	8207.87	8050.78	7952.55	7880.02
Peak discharge/Precipitation (%):	28.52	27.77	27.38	27.31	26.88	27.46	26.93	26.61	26.36

Annexe X. Tableau global résultats des simulations d'hydraulique douce à Eckwersheim pour les flux concentrés et les scénarios de combinaison

Variable	BE_concentre _5m	BM_concentre_ 5m	haie_concentre _3lignes	fascine_concentre	BE_concentre_10 m	BM_concentre _10m	haie_concentre _6lignes	Combinaison	Référence version 2.01
Total infiltration (mm):	25.12	25.17	25.23	25.19	25.16	25.25	25.37	26.96	24.96
Total outflow (all flows) (mm):	9.87	9.81	9.75	9.53	9.83	9.72	9.62	7.66	9.87
Flow detachment (land) (ton):	2596.69	2604.30	2701.59	3025.53	2586.93	2605.95	2726.85	2852.05	2808.99
Deposition (land) (ton):	-1872.06	-1886.61	-2104.09	-1892.39	-1863.56	-1898.77	-2179.25	-1888.58	-2049.91
Total soil loss (ton):	828.32	821.41	701.36	630.18	826.97	810.83	651.35	446.75	796.14
Average soil loss (kg/ha):	9670.30	9589.60	8188.01	7357.12	9654.48	9466.05	7604.26	5215.62	9294.62
Peak discharge for outlet 0 (l/s):	7636.50	7238.10	7283.50	4078.30	7676.36	6813.34	7135.16	6340.52	6512.69
Peak time precipitation (min):	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08
Peak time discharge for outlet 0 (min):	33.25	34.17	34.17	36.67	33.08	35.25	34.42	29.17	37.75
Peak discharge for outlet 1 (l/s):	7636.50	7238.10	7283.50		7676.36	6813.34	7135.16		
Peak discharge for outlet 2 (l/s):	1811.37	1774.04	1800.62		1808.47	1741.69	1777.12		
Peak discharge for outlet 3 (l/s):	4162.51	4002.84	4057.37		4157.39	3865.71	3982.73		
Peak discharge for outlet 4 (l/s):	2165.30	2167.19	2167.95		2149.00	2169.20	2147.33		
Peak discharge for outlet 5 (l/s):	7291.22	6963.52	7017.11		7311.86	6602.10	6886.69		
Peak time discharge for outlet 1 (min):	33.25	34.17	34.17		33.08	35.25	34.42		
Peak time discharge for outlet 2 (min):	25.17	25.75	25.58		25.00	26.17	25.67		
Peak time discharge for outlet 3 (min):	27.92	28.58	28.50		27.75	29.50	28.67		
Peak time discharge for outlet 4 (min):	23.75	23.58	23.83		23.75	24.00	23.92		
Peak time discharge for outlet 5 (min):	31.00	31.83	31.83		30.83	32.83	32.00		
Total channel+OF discharge (m3):	8418.96	8375.72	8323.03	8135.70	8386.14	8292.12	8206.88	6534.13	8425.01
Peak discharge/Precipitation (%):	28.17	28.02	27.84	27.22	28.06	27.74	27.46	21.86	28.19

Annexe XI. Tableau global résultats des simulations d'hydraulique douce à Ruederbach pour les flux diffus

Variable	Référence version 4.01	Référence_fascine _erosion	be_5m_ diffus	bm_5m_ diffus	haie_3lignes _diffus	fascine_5m _diffus	be_10m _diffus	bm_10m_ diffus	haie_6lignes _diffus	fascine_10m _diffus
Total infiltration (mm):	23.19		23.36	23.45	23.48	23.47	23.52	23.71	23.63	23.67
Total outflow (all flows) (mm):	11.83		11.66	11.57	11.54	11.49	11.50	11.31	11.39	11.28
Flow detachment (land) (ton):	3446.73	9646.96	3326.33	3332.01	3466.87	9579.02	3259.74	3269.61	3444.90	9434.99
Deposition (land) (ton):	-1849.07	-3967.32	-1821.64	-1878.93	-2141.02	-4001.48	-1789.84	-1897.86	-2281.85	-3913.19
Total soil loss (ton):	1852.70	6048.21	1763.19	1712.36	1584.73	5890.29	1727.64	1631.84	1423.13	5810.58
Average soil loss (kg/ha):	9537.51	31135.51	9076.72	8815.07	8158.00	30322.56	8893.71	8400.52	7326.13	29912.25
Peak discharge for outlet 0 (l/s):	15949.97		15804.99	15813.55	15693.81	14940.88	15601.48	15585.96	15553.02	14668.15
Peak time precipitation (min):	14.08		14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08
Peak time discharge for outlet 0 (min):	33.75		33.83	33.92	33.83	33.92	33.83	34.25	33.92	34.00
Peak discharge for outlet 1 (l/s):	15949.97		15804.99	15813.55	15693.81		15601.48	15585.96	15553.02	
Peak time discharge for outlet 1 (min):	33.75		33.83	33.92	33.83		33.83	34.25	33.92	
volume d'eau [m3]	22956.67		22616.38	22443.50	22390.21	22283.66	22309.68	21935.81	22102.70	21890.40

Annexe XII. Tableau global résultats des simulations d'hydraulique douce à Ruederbach pour les flux concentré et le scénario combiné

Variable	haie_3lignes fascine_5m fascine_10m be_10m bm_10m haie_6lignes								Combinaison
	be_5m_conc	bm_5m_conc	_conc	_conc	_conc	_conc	conc	_conc	
Total infiltration (mm):	23.22	23.23	23.24	23.25	23.28	23.23	23.27	23.28	23.60
Total outflow (all flows) (mm):	11.80	11.79	11.78	11.72	11.69	11.79	11.75	11.74	11.22
Flow detachment (land) (ton):	3391.04	3400.59	3454.34	9573.67	9526.21	3387.32	3358.48	3452.93	10758.19
Deposition (land) (ton):	-1837.49	-1849.38	-2009.70	-3789.11	-3766.66	-1830.82	-1848.69	-2115.62	-5084.02
Total soil loss (ton):	1808.77	1806.91	1700.08	5962.31	5937.24	1811.92	1766.86	1592.96	2285.40
Average soil loss (kg/ha):	9311.35	9301.78	8751.83	30693.31	30564.27	9327.58	9095.61	8200.37	11765.00
Peak discharge for outlet 0 (l/s):	15917.96	15674.27	15846.16	14851.11	14820.34	16027.00	15376.09	15787.27	8497.46
Peak time precipitation (min):	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08
Peak time discharge for outlet 0 (min):	33.75	34.00	33.83	31.83	31.75	33.58	34.33	33.83	52.67
Peak discharge for outlet 1 (l/s):	15917.96	15674.27	15846.16			16027.00	15376.09	15787.27	
Peak time discharge for outlet 1 (min):	33.75	34.00	33.83			33.58	34.33	33.83	
volume d'eau [m3]	22886.25	22878.76	22849.41	22737.42	22671.97	22874.76	22786.93	22782.22	21771.91

Annexe XIII. Résultats des simulations en prenant compte les bassins de rétention, les assolements concertés et le non labour à Eckwersheim

	Référence	Assolement concerté	Bassin rétention	Non labour
LISEM results at time (min):,	149.83	149.83	149.83	149.83
Catchment area (ha):	85.66	85.66	85.54	85.66
Total Precipitation (mm):	35.03	35.03	35.03	35.03
Total interception (mm):	0.00	0.00	0.19	0.00
Total House interception (mm):	0.00	0.00		0.00
Total infiltration (mm):	24.99	26.98	24.95	31.99
Surface storage (mm):	0.0011	0.0009	0.0005	0.0004
Water in overland flow (mm):	0.05	0.09	0.01	0.02
Total outflow (all flows) (mm):	9.99	7.96	8.87	3.01
Total channel+OF discharge (m3):	8523.84	6791.46	7558.34	2566.35
Total flood discharge (m3):	0.00	0.00		0.00
Total Tile discharge (m3):	0.00	0.00		0.00
Peak time precipitation (min):	14.08	14.08	14.08	14.08
Peak discharge/Precipitation (%):	28.52	22.72	25.32	8.59
Flood volume (max level) (m3):	0.00	0.00		0.00
Flood area (max level) (m2):	0.00	0.00		0.00
Splash detachment (land) (ton):	104.33	92.14	46.10	71.73
Flow detachment (land) (ton):	2621.57	2124.75	2933.31	821.15
Deposition (land) (ton):	-1890.77	-1655.02	-1985.27	-860.95
Suspended Sediment (land) (ton):	0.39	0.45	18.94	0.85
Total soil loss (ton):	834.73	561.42	859.11	37.05
Average soil loss (kg/ha):	9745.07	6554.31	10043.60	432.59
Peak discharge for outlet 0 (l/s):	7499.80	5946.71	6835.63	1022.09
Peak discharge for outlet 1 (l/s):	7499.80	5946.71		1022.09
Peak discharge for outlet 2 (l/s):	1826.03	999.42		366.69
Peak discharge for outlet 3 (l/s):	4171.21	2697.49		774.98
Peak discharge for outlet 4 (l/s):	2195.83	1804.43		651.63
Peak discharge for outlet 5 (l/s):	7204.50	5815.47		1034.09
Peak time discharge for outlet 0 (min):	33.83	35.67	35.75	59.00
Peak time discharge for outlet 1 (min):	33.83	35.67		59.00
Peak time discharge for outlet 2 (min):	25.50	24.25		38.75
Peak time discharge for outlet 3 (min):	28.33	27.92		42.42
Peak time discharge for outlet 4 (min):	23.83	24.17		31.58
Peak time discharge for outlet 5 (min):	31.50	32.67		54.33
Susp. Sediment (buffers) (ton):			-116.10	

Annexe XIV. Résultats des simulations avec les assolements concertés le non labour et les bandes enherbées le long des fossés à Ruederbach

LISEM run with;	Référence	assolement concerté	Bandes enherbées de 5 m le long des fossés	Non labour
LISEM results at time (min);	199.83	199.83	199.83	199.83
Catchment area (ha):	194.25	194.25	194.25	194.25
Total Precipitation (mm):	35.03	35.03	35.03	35.03
Total interception (mm):	0.00	0.00	0.00	0.00
Total House interception (mm):	0.00	0.00	0.00	0.00
Total infiltration (mm):	23.19	26.29	23.85	30.01
Surface storage (mm):	0.000	0.000	0.000	0.000
Water in overland flow (mm):	0.00	0.00	0.00	0.00
Water in flood (mm):	0.00	0.00	0.00	0.00
Water in channels (mm):	0.01	0.01	0.01	0.01
Total outflow (all flows) (mm):	11.83	8.72	11.17	5.00
Total channel+OF discharge (m3):	22956.67	16924.69	21666.79	9707.97
Peak time precipitation (min):	14.08	14.08	14.08	14.08
Peak discharge/Precipitation (%):	33.78	24.91	31.88	14.29
Flood volume (max level) (m3):	0.00	0.00	0.00	0.00
Flood area (max level) (m2):	0.00	0.00	0.00	0.00
Splash detachment (land) (ton):	236.74	200.75	232.91	160.19
Flow detachment (land) (ton):	3446.73	2289.96	2927.96	984.16
Deposition (land) (ton):	-1849.07	-1374.79	-1739.17	-712.53
Suspended Sediment (land) (ton):	0.29	0.70	2.12	1.66
Flow detachment (channels) (ton):	56.81	55.37	56.57	54.36
Deposition (channels) (ton):	-38.22	-33.33	-23.45	-21.92
Total soil loss (ton):	1852.70	1137.25	1452.70	462.60
Average soil loss (kg/ha):	9537.51	5854.45	7478.36	2381.40
Peak discharge for outlet 0 (l/s):	15949.97	11529.60	15184.29	4895.99
Peak discharge for outlet 1 (l/s):	15949.97	11529.60	15184.29	4895.99
Peak time discharge for outlet 0 (min):	33.75	34.00	34.00	33.58
Peak time discharge for outlet 1 (min):	33.75	34.00	34.00	33.58

Annexe XV. Résultats des simulations de gestion des fossés à Ruederbach

LISEM run with:	Référence	Fossé en béton	Fossé enherbé	Fossé à redents	fossé enherbé à redents
LISEM results at time (min):	199.83	199.83	199.83	199.83	199.83
Catchment area (ha):	194.25	194.25	194.25	194.25	194.25
Total Precipitation (mm):	35.03	35.03	35.03	35.03	35.03
Total interception (mm):	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total House interception (mm):	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total infiltration (mm):	23.19	23.19	23.18	23.19	23.18
Water in channels (mm):	0.01	0.00	0.04	0.02	0.09
Total outflow (all flows) (mm):	11.83	11.84	11.81	11.82	11.75
Total channel+OF discharge (m3):	22956.67	22968.96	22908.18	22936.02	22803.30
Total flood discharge (m3):	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Tile discharge (m3):	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peak time precipitation (min):	14.08	14.08	14.08	14.08	14.08
Peak discharge/Precipitation (%):	33.78	33.80	33.71	33.75	33.56
Flood volume (max level) (m3):	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Flood area (max level) (m2):	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Splash detachment (land) (ton):	236.74	236.74	236.74	236.74	236.74
Flow detachment (land) (ton):	3446.73	3446.57	3447.97	3446.79	3447.43
Deposition (land) (ton):	-1849.07	-1849.09	-1850.01	-1849.16	-1849.51
Suspended Sediment (land) (ton):	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
Flow detachment (channels) (ton):	56.81	58.27	58.35	57.02	62.71
Deposition (channels) (ton):	-38.22	-23.28	-54.16	-47.44	-61.93
Susp. Sediment (channels) (ton):	0.00	0.00	0.00	0.00	3.72
Total soil loss (ton):	1852.70	1868.92	1838.61	1843.67	1831.45
Average soil loss (kg/ha):	9537.51	9621.02	9464.96	9491.03	9428.09
Peak discharge for outlet 0 (l/s):	15949.97	19628.50	9179.06	12076.89	6174.51
Peak discharge for outlet 1 (l/s):	15949.97	19628.50	9179.06	12076.89	6174.51
Peak time discharge for outlet 0 (min):	33.75	28.58	51.00	41.50	70.50
Peak time discharge for outlet 1 (min):	33.75	28.58	51.00	41.50	70.50