



Université Paris-Diderot, UFR G.H.S.S

Master 2 Géographie et Sciences des Territoires

« Dynamique des Milieux et Risques »

2015/2016

Ruissellement érosif et efficacité de différents dispositifs d'hydraulique douce pour lutter contre les coulées d'eaux boueuses dans le Bas-Rhin (67)

Mémoire soutenu par Benoît FRICONNET, le 14/06/2016

Maître de stage : Paul Van Dijk, Chargé d'étude à l'ARAA (Association pour la Relance Agronomique en Alsace)

Directeurs de mémoire : François BÉTARD, Maître de Conférences à l'Université Paris 7
Vincent VIEL, Maître de Conférences à l'Université Paris 7

Composition du jury : François BÉTARD, Frédéric GOB, Laurent LESPEZ,
Vincent VIEL

Table des matières

Remerciements.....	4
Introduction.....	6
1. État de l'art.....	10
2. Rôle des surfaces contributives sur l'efficacité de rétention en sédiments d'un dispositif d'hydraulique douce de type fascine....	22
3. Évaluation de l'efficacité de rétention en sédiments par différents dispositifs d'hydraulique douce dans le Bas-Rhin.....	53
Bibliographie.....	92
ANNEXES.....	96
Tables.....	104

Remerciements

Merci à l'ensemble de l'équipe de l'ARAA ; Rémi, Joëlle, Anne-Marie, Pierre, Olivier, Anne et Grégory, pour leur accueil au sein de l'association. Je souhaite particulièrement remercier Paul de m'avoir permis de réaliser ce stage à l'ARAA, pour sa disponibilité et l'ensemble des apports scientifiques et méthodologiques qu'il m'a apporté.

Je souhaite également remercier Véronique Auzet (Université de Strasbourg), Claire Cugnière (CARA), et Léa Kervroedan (Lasalle) pour leurs expériences sur le ruissellement érosif et le rôle des dispositifs d'hydraulique douce, lors des visites de terrain. Je tiens également à remercier Claire Lauvernet et Guy Le Henaff, de l'IRSTEA de Lyon, pour leurs précieux conseils sur fonctionnement du modèle VFSMOD.

Je tiens enfin à remercier l'ensemble du corps enseignant et des personnels administratifs de l'Université Paris-Diderot, qui m'ont suivi depuis le début de ma reprise d'étude en licence de géographie. Ce parcours fut extrêmement riche en connaissances scientifiques et en enseignements pratiques. Je remercie particulièrement mes directeurs de mémoire, François Bétard et Vincent Viel, qui m'ont suivi tout au long du stage et de mon parcours universitaire. Merci également à Frédéric Gob et Laurent Lespez qui ont accepté d'évaluer ce travail en faisant partie du jury.

Introduction

Les coulées d'eaux boueuses sont des phénomènes de plus en plus fréquents en Alsace (Van Dijk *et al.*, 2005 ; Armand, 2009 ; Heitz *et al.*, 2009). Entre 1982 et 2005, 225 communes ont été touchées au moins une fois dans cette région (Auzet *et al.*, 2005). Elles peuvent engendrer des dégradations importantes en amont, au sein des agro- et écosystèmes, et en aval, par des dégâts occasionnés aux infrastructures collectives et à l'habitat individuel.

Ces aléas sont principalement dus à l'érosion des sols en amont, sur les parcelles cultivées des zones lœssiques d'Alsace (Kochersberg, Outre-Forêt, Sundgau et le Piémont vosgien), caractérisées par un maximum d'orages à la fin du printemps, des sols limoneux à très faible stabilité structurale, et des systèmes agraires associés à des cultures peu couvrantes (notamment le maïs), au moment des épisodes orageux.

Les mesures en œuvre pour lutter contre ce phénomène sont de différentes natures, et concernent à la fois les pratiques culturales et les dispositifs d'hydraulique douce. Parmi les pratiques culturales permettant de limiter l'érosion, on peut citer les Techniques Culturales Sans-Labour (TCSL). La première phase du projet GERIHCO (Gestion des Risques et Histoire des COulées boueuses) a montré que ces techniques peinent à se généraliser dans les secteurs à risque. Dans ce cas, les dispositifs d'hydraulique douce, tels que les fascines et les haies peuvent permettre de réduire le ruissellement, l'érosion, et limiter les risques de coulées d'eaux boueuses, en retenant les sédiments à l'amont.

1. Contexte de l'étude et du stage

L'« étude globale du génie végétal pour intercepter les sédiments » fait l'objet de l'axe de recherche du projet GERIHCO, auquel je participe durant ce stage au sein de l'ARAA (Association pour la Relance Agronomique en Alsace) depuis le 15 février et jusqu'au 12 août 2016. Cette étude vise à évaluer l'efficacité d'interception de différents dispositifs d'hydraulique douce, dans la durée, à partir d'une étude multicritères (paramètres hydrauliques, valorisation économique, risques invasifs et effets sur la biodiversité). Dans le cadre de ce programme de recherche, l'ARAA met en œuvre son expertise de terrain et un savoir-faire en modélisation du ruissellement érosif en contexte agricole. Pour ce faire, deux stages, sur deux ans, ont été prévus. Le premier, en 2016 (ce travail), vise à quantifier l'efficacité de rétention en sédiments par différents dispositifs d'hydraulique douce à l'échelle

du versant. Le second, en 2017, sera conduit à l'échelle du bassin-versant pour évaluer l'impact des obstacles sur les flux arrivants en zones présentant des enjeux.

Cette année, le stage vise donc à mieux comprendre les interactions entre les flux hydro-sédimentaires provenant de l'amont et le dispositif d'hydraulique douce. Pour cette raison, l'étude est conduite à l'échelle du versant. Pour mieux comprendre ces interactions, le stage se structure autour des trois étapes suivantes :

- Caractériser différents dispositifs d'hydraulique douce ainsi que la surface contributive associée. Pour ce faire, un protocole de mesures et d'observations est conduit sur différents sites identifiés suivant leurs intérêts (densités, espèces, âges, surface contributive en amont...).
- Traduire les mesures et observations en paramètres hydrauliques propres à chacun des dispositifs. Cette étape vise à attribuer, à chacun des dispositifs, un coefficient de rugosité associé à ses caractéristiques (dimensions, densités...).
- Modéliser le ruissellement depuis l'amont et l'interaction « surface contributive / dispositif ». Pour ce faire, le modèle VFSSMOD, permet, à partir des caractéristiques de la surface contributive et d'un événement pluvieux, de simuler les flux hydro-sédimentaires arrivant sur un dispositif d'hydraulique douce. Il permet également de modéliser l'efficacité des bandes enherbées à retenir les sédiments.

2. Objectifs

Deux principaux objectifs ont permis de structurer ce rapport :

1. Quantifier les flux hydro-sédimentaires arrivant sur un dispositif d'hydraulique douce, à partir des paramètres associés à sa surface contributive, et d'un événement pluvieux.
2. Estimer l'efficacité de rétention en sédiments de différents dispositifs d'hydraulique douce, au regard de leurs caractéristiques (couverture végétale, états de surface, propriétés du sol...).

L'intérêt de ce mémoire est donc double. Il permet d'abord de présenter le travail préalable et indispensable à ce stage, c'est à dire d'élaborer une méthode pour quantifier les flux hydro-sédimentaires arrivant sur un dispositif d'hydraulique douce. De plus, il doit permettre d'évaluer l'importance de l'efficacité des dispositifs, suivant leurs caractéristiques.

3. Présentation du plan

Une première partie est dédiée à une synthèse bibliographique des études déjà réalisées, à la fois pour quantifier les apports hydro-sédimentaires d'une surface contributive, et pour estimer l'efficacité de différents dispositifs d'hydraulique douce.

Une deuxième partie présente une méthodologie pour quantifier les flux hydro-sédimentaires provenant de deux surfaces contributives à Ettendorf. Au cours de cette partie, le modèle utilisé (VFSSMOD) pour quantifier les flux et les méthodes d'acquisition des données seront présentés. Cette partie intègre également une estimation de l'efficacité potentielle d'un dispositif d'hydraulique douce de type fascine, qui dépend essentiellement des caractéristiques des surfaces contributives étudiées.

Enfin, au cours d'une troisième et dernière partie, une évaluation de l'efficacité de différents dispositifs d'hydraulique douces, sélectionnés dans le Bas-Rhin, sera proposée, au regard de leurs différentes caractéristiques (couverture végétale, états de surface, propriétés du sol).

1. État de l'art

1.1. À l'origine des coulées d'eaux boueuses, le ruissellement érosif

1.1.1. Les Coulées d'Eaux Boueuses (CEB)

Les coulées de boues sont des aléas naturels qui se manifestent par un écoulement rapide d'eau en surface associé à un important taux de matières en suspension. Deux types de processus peuvent être distingués :

(1) Les écoulements fluides à forte charge en matières en suspension : ce processus se caractérise par un ruissellement qui peut être concentré (à travers des rigoles ou des ravines) ou diffus, comportant un important taux de matières en suspensions (MES) dont l'origine correspond aux sols pédologiques (Auzet *et al.*, 2005). L'agent de transport principal étant l'eau, ce processus ne nécessite pas forcément des pentes fortes pour se déclencher. Les régions de plaines et plateaux sont d'ailleurs les principales zones concernées par ce phénomène, dans les régions cultivées du Nord de l'Europe (Auzet *et al.*, 1992 ; Van Dijk, 2001 ; Armand, 2009).

(2) Les écoulements visqueux, qui se manifestent par un mouvement de masse charriant des matériaux hétérogènes (matrice fine et blocs) pour lequel la gravité est l'agent de transport principal, au même titre que l'eau (Auzet *et al.*, 2005). Ce processus se manifeste surtout en régions de piémont et montagne, caractérisées par des écoulements chenalés et des rivières à régime torrentiel.

Le phénomène justifiant l'intérêt de cette étude dans le Bas-Rhin correspond au premier type (1). Pour éviter toute confusion, le terme de « Coulées d'Eaux Boueuses » (CEB) sera privilégié pour la suite du travail. Ces dernières résultent de l'érosion hydrique des sols, qui sévit prioritairement sur les grandes surfaces cultivées, dépourvues d'un couvert végétal permanent.

1.1.2. L'érosion hydrique des sols en régions de grandes cultures

Pour se déclencher, ce phénomène nécessite deux principaux facteurs : de fortes précipitations, entraînant une dégradation de la surface des sols, et un stock de particules fines, pour alimenter le ruissellement, disponible au sein des sols à faible stabilité structurale. C'est le cas des régions de grandes cultures du Nord de l'Europe, qui peuvent être affectées par des coulées d'eaux boueuses à l'occasion de deux principales périodes : au cours des longues précipitations hivernales, et durant les orages de printemps et d'été. Les longues précipitations hivernales affectent surtout les régions du Nord-Ouest du Bassin-Parisien, dont B. Friconet

les cultures d'hiver, peu couvrantes, exposent les sols limoneux au phénomène de battance. L'Est du bassin Parisien est, quant à lui, principalement affecté par les orages de printemps et d'été, lorsque les sols, limoneux à argileux, sont peu couverts par les cultures de printemps. (Auzet *et al.*, 1992 ; Le Bissonnais *et al.*, 2002).

•Processus du ruissellement érosif

Le ruissellement se met en place à partir de deux principaux processus que nous pouvons distinguer, mais qui peuvent également se combiner. Lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration des sols, on parle de ruissellement « hortonien ». Lorsque les sols sont partiellement ou totalement saturés par une nappe, on parle de ruissellement « par saturation » (Armand, 2009).

Au sein des régions limoneuses du Nord de la France, la faible stabilité structurale, due à la faible cohésion des agrégats des limons, expose les sols au phénomène de battance. De ce fait, l'effet des gouttes de pluie sur les sols non couverts par la végétation désagrège rapidement la structure des sols, passant d'un état poreux et meuble à un état lisse et quasi-imperméable (Auzet *et al.*, 1992), ce qui favorise fortement le ruissellement.

Sur les plateaux à pentes faibles, le ruissellement commence généralement à progresser de façon diffuse ; on parle alors de ruissellement « diffus », ou « en nappe ». Mais lorsque les précipitations et les pentes sont suffisantes, le ruissellement se concentre dans les talwegs et forme parfois des rigoles ou des ravines ; on parle alors de ruissellement « concentré » (Cerdan *et al.*, 2006b ; Armand, 2009). La concentration du ruissellement est favorisée par le passage des engins agricoles, créant des couloirs préférentiels compactés (donc imperméables) de ruissellement. Un travail du sol dans le même sens que la pente favorise également sa concentration et son pouvoir érosif.

L'érosion des sols cultivés résulte de l'ablation, du transport et du dépôt des particules de terre par l'eau, principalement à l'occasion d'un ruissellement concentré sur des surfaces à faible stabilité structurale. En Europe, l'érosion des sols est un phénomène aux conséquences multiples, et représente un enjeu environnemental majeur (Cerdan *et al.*, 2006b). Les dégâts occasionnés peuvent affecter les parcelles à l'amont, et à l'aval, au niveau des zones de dépôt.

•Conséquences du ruissellement érosif

À l'amont, le décapage des sols conduit à une réduction de sa fertilité, l'horizon superficiel, affecté par l'érosion, étant le plus riche en matières organiques (Auzet *et al.*, 1992 ; Le Bissonnais *et al.*, 2002 ; Cerdan *et al.*, 2006b ; Armand, 2009). Bien qu'affectant davantage les régions tropicales, ce phénomène peut avoir des conséquences irréversibles, même aux latitudes tempérées. En effet, le sol est une ressource non-renouvelable à l'échelle

humaine et sa diminution peut, à plus long terme, entraîner une perte définitive de fertilité lorsque la pédogenèse n'est pas suffisamment rapide (Le Bissonnais *et al.*, 2002). En outre, à court terme, les ravines, la destruction ou l'enfouissement des plants peuvent engendrer d'importants coûts pour les agriculteurs (Auzet *et al.*, 1992, Le Bissonnais *et al.*, 2002).

À l'aval, les conséquences du ruissellement érosif peuvent se manifester par l'occurrence de coulées d'eaux boueuses, pour les événements les plus intenses. En effet, le ruissellement, lorsqu'il affecte d'importantes surfaces peu couvertes par la végétation et dont les sols disposent d'une faible stabilité structurale, arrache et entraîne les particules vers l'aval. Aidé par un relief même peu vigoureux, le ruissellement se concentre progressivement et peut provoquer des inondations boueuses lorsqu'il se déverse sur des zones à enjeux. La pollution et l'augmentation de la turbidité des cours d'eau et des nappes sont également une conséquence directe du ruissellement érosif, particulièrement sur les zones de grandes cultures affectées par un usage massif de produits phytosanitaires (Auzet *et al.*, 1992 ; Le Bissonnais *et al.*, 2002 ; Armand, 2009).

1.1.3. Une tendance à une intensification des événements

Depuis les années 70, les dégâts associés au ruissellement érosif augmentent progressivement en Europe. 17 % des surfaces sont concernées par l'érosion hydrique, avec des pertes en terre de l'ordre de 12 tonnes/ha/an pour les cultures de printemps (Cerdan *et al.*, 2006a). L'évolution du climat, associée à des événements pluvieux plus intenses, ne peut cependant expliquer à elle seule l'augmentation de ces événements. En revanche, les causes de l'intensification des dégâts peuvent être trouvées à travers des facteurs prédisposant, notamment l'importante évolution de l'occupation du sol des cinquante dernières années (Auzet *et al.*, 1992 ; Cerdan *et al.*, 2006 ; Armand, 2009). Ces changements sont de deux ordres : une transformation des paysages et des pratiques agricoles (augmentation de la taille du parcellaire, mécanisation et suppression des haies), et une pression péri-urbaine qui favorise les transferts hydro-sédimentaires et la vulnérabilité des populations (Armand, 2009).

Pour mieux comprendre et anticiper le phénomène, la modélisation est un outil efficace permettant de simuler, à différentes échelles, le ruissellement hydrique et les flux sédimentaires associés.

1.1.4. Présentation de différents modèles de ruissellement et d'érosion des sols

La modélisation du ruissellement érosif permet de connaître, comprendre et anticiper la dégradation des sols par l'érosion et ses conséquences à l'aval (coulées d'eaux boueuses),

au regard de différents scénarios. Pour ce faire, différentes méthodes permettent de spatialiser le phénomène érosif, afin d'identifier les zones potentiellement exposées. Beaucoup de ces modèles offrent en effet un déploiement facilité dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG). La démarche modélisatrice permet également de quantifier les apports terrigènes associés à l'érosion des sols. Pour cela, de nombreux outils peuvent être mis en œuvre, chacun développés à des échelles très variables. Les modèles présentés ci-après ne constituent pas une liste exhaustive des méthodes employées, mais permettent d'illustrer la panoplie des outils utilisés en modélisation.

•À petite échelle

Afin d'évaluer l'effet du changement climatique sur l'érosion des sols, le modèle PESERA (*Pan European Soil Erosion Risk Assessment*), a été développé pour simuler différents scénarios à l'échelle de l'Europe. Suivant des volumes quotidiens de précipitations, la capacité de rétention de l'eau par les sols et l'interception par la végétation, ce modèle calcule des taux d'érosion (en tonnes/hectares/an) suivant un pas de temps journalier (Van Rompaey *et al.*, 2003). Adapté à l'échelle nationale et régionale, l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), en partenariat avec l'IFEN (Institut Français de l'Environnement), a mis en œuvre le modèle MESALES (Modèle d'Évaluation Spatiale de l'ALéa Érosion des Sols), qui se fonde sur des critères qualitatifs pour définir 5 niveaux d'aléas. Chaque classe d'aléa (de « très faible » à « très élevé ») résulte d'une combinaison de paramètres hiérarchisés et pondérés à partir de connaissances empiriques et actuelles sur les différents types de fonctionnements érosifs : l'érosivité des précipitations, l'occupation du sol, la sensibilité à la battance, la topographie et l'érodabilité des sols (Colmar *et al.*, 2010). Prenant en compte le phénomène de battance, ce modèle est particulièrement bien adapté pour identifier la sensibilité à l'érosion des surfaces les plus exposées à la fois aux précipitations et au ruissellement érosif des régions de grandes cultures.

•À moyenne échelle

À l'échelle du bassin versant, de nombreux modèles à base physique ont intégré les pratiques agricoles afin de prendre en compte au mieux les processus du ruissellement hydrique en région de grandes cultures. Pour la plupart de ces modèles, les données d'entrée et de sortie sont aisément intégrables aux logiciels de SIG. Par exemple, le modèle STREAM (*Sealing and Transfer by Runoff and Erosion in relation with Agricultural Management*) permet d'intégrer les pratiques agricoles (motifs agraires, traces de roue..) et les éléments paysagers (haies, routes..) pour simuler le ruissellement et l'érosion à l'échelle d'un événement pluvieux. Il est adapté pour quantifier l'érosion diffuse et concentrée à l'échelle de la parcelle et du bassin-versant, en prenant en compte les états de surface du sol, la rugosité, le couvert

végétal, ainsi que l'intensité des précipitations. Toutefois, calibré à partir de données de terrain du Pays-de-Caux, ce modèle, qui prend en compte le phénomène de battance, est surtout adapté au climat et régions limoneuses du Nord de la France (Couturier *et al.*, 2013). Pour différents contextes régionaux, le modèle LISEM (*Limbourg Soil Erosion Model*) permet également de prendre en compte les pratiques culturales, pour simuler le ruissellement et l'érosion (ablation, transport et dépôt) à l'échelle du bassin-versant. Ce modèle utilise les paramètres d'occupation de l'espace, du sol, de la topographie et des précipitations pour décrire les processus élémentaires de ruissellement et d'érosion à l'échelle d'un événement pluvieux. Ceci permet de répondre aux demandes des chambres d'agricultures, qui travaillent directement avec les agriculteurs, pour la mise en place des assolements concertés et des techniques culturales sans labour (Lefrancq *et al.*, 2013).

•À grande échelle

À l'échelle de la parcelle, le modèle USLE (*Universal Soil Loss Equation*), développé par Wischmeier et Smith (1978) aux États-Unis, est un modèle empirique permettant de quantifier les pertes en sols. Selon ce modèle, le taux moyen annuel de perte en sols (A, en tonnes/hectares/an) peut être calculé à partir d'une fonction multiplicative de l'érosivité des pluies (R), de l'érodabilité du sol (K), de la déclivité des versants (LS), de l'occupation des sols (C) et des pratiques anti-érosives (P), selon la formule :

$$A = R * K * LS * C * P$$

Ce modèle, développé pour les surfaces à faibles pentes des grandes plaines américaines, ne prend pas en compte le ruissellement concentré ni les transferts hydro-sédimentaires. De plus, ce modèle s'applique à partir de données moyennes de précipitation et ne permet pas de simuler des taux d'érosion à l'échelle d'un événement pluvieux. Toutefois, sa robustesse, sa reproductibilité, ainsi que sa facilité d'intégration aux SIG font de ce modèle l'un des plus utilisés, en vue d'une première estimation des taux d'érosion (Payet *et al.*, 2011).

1.2. L'hydraulique douce pour lutter contre les coulées d'eaux boueuses

Au vu des dégâts générés par le ruissellement érosif (coulées de boue, diminution de la fertilité des sols et augmentation de la pollution des eaux), des programmes d'actions sont mis en œuvre pour réduire simultanément l'érosion des sols en amont et les coulées d'eaux boueuses en aval. Deux stratégies sont généralement employées. L'une, curative, vise à réduire les débits de pointe et protéger les populations contre les inondations d'eaux boueuses, par la mise en place d'ouvrages structurants (bassins de rétention, seuils hydrauliques) principalement dans les zones de transfert entre l'amont et l'aval (Ouvry *et al.*, 2012). L'autre, préventive, vise à limiter le ruissellement et l'érosion à l'amont, soit par des méthodes favorisant l'infiltration (pratiques agro-pastorales, assolement concerté, techniques culturales sans-labour...), soit par l'aménagement d'éléments paysagers, visant à ralentir le ruissellement et intercepter les sédiments (Ouvry *et al.*, 2012 ; Van Dijk *et al.*, accepté). Bien que ces mesures, pour être réellement efficaces, soient complémentaires, de nombreuses études quantitatives montrent l'intérêt des dispositifs d'hydraulique douce, lorsque les conditions de mise en œuvre sont respectées (Dabney *et al.*, 1995 ; Gumière *et al.*, 2011 ; Ouvry *et al.*, 2012 ; Richet *et al.*, 2014 ; Zhao *et al.*, 2016).

1.2.1. Typologie des principaux dispositifs d'hydraulique douce

Les aménagements d'hydraulique douce sont variés et peuvent se présenter sous la forme de fascines, de haies ou encore de bandes enherbées. Leurs fonctions sont multiples. Ainsi, les haies anti-érosives sont à la fois un réservoir pour la biodiversité, retiennent et stabilisent les colluvions, et participent à enrichir l'activité biologique des sols. L'une des fonctions communes à ces aménagements, et qui nous intéresse dans le cadre de cette étude, est celle associée à la rétention des sédiments à l'amont des dispositifs. Cette fonction s'appuie sur le concept de « barrières végétales » ou encore de « structure de dissipation d'énergie » (Ouvry *et al.*, 2012). Suivant ce principe, le ralentissement hydraulique associé au frein créé par l'obstacle et par l'augmentation de l'infiltrabilité du sol dans la zone traversée par l'eau (associée au réseau racinaire et à l'activité biologique) provoque un dépôt accéléré des MES.

Une typologie des principaux aménagements peut être présentée, inspirée de celle définie par Ouvry *et al.*, (2012). Cette typologie n'est pas exhaustive ; elle prend en compte les dispositifs rencontrés et étudiés dans le cadre du stage sur différents sites du Bas-Rhin : les fascines (« mortes » et « vivantes »), les haies (« arbustives » et « herbacées »), et les associations (fascines, haies et bandes enherbées) :

Fascines



*Photographie 1 :
Fascine installée en
2009, Ettendorf (67),
Auteur : B. Friconnet, le
18/04/2016*

Fascines mortes

Aménagement linéaire constitué de deux rangées de pieux entre lesquelles sont déposés des branchages qui constituent un « fagot ». Il représente un obstacle perméable très efficace pour freiner l'eau, même en cas de ruissellement concentré.



*Photographie 2 : Fascine avec
pieux vivants.
Source : SMBV
du Dun et de la
Veules (Ouvry et
al., 2012)*

Fascines vivantes

Ces dernières disposent de la même structure que les précédentes mais comportent au moins un élément vivant, les pieux ou des tiges piquées autour du fagot. La pousse en continu des branches permet de recharger et d'entretenir le fagot lorsque ce dernier s'altère ou se compacte.

Haies anti-érosives



*Photographie 3 : Haie de Saules à Alteckendorf (67), le 10/03/16.
Auteur : B. Friconnet*

Haies arbustives

Les haies anti-érosives, mono- ou plurispécifiques, sont constituées d'une ou plusieurs rangées d'arbustes ou d'arbres. Généralement, une végétation herbacée au pied du dispositif participe également au frein hydraulique et à l'infiltrabilité du sol.



*Photographie 4 : Haie de
Miscanthus giganteus à
Bitchhofen (67), le 10/03/06.
Auteur : B. Friconnet.*

Haies herbacées

Bandes de végétaux herbacés pérennes, parfois de plusieurs mètres de large. Les espèces utilisées, généralement des poacées, offrent un port raide et élevé (le *Miscanthus giganteus* peut aller jusqu'à 4 mètres de hauteur), ainsi qu'une forte densité de tiges.

Associations



Photographie 5 : Association de haie et fascine à Ringeldorf (67), le 11/04/16. Auteurs : B. Friconet

Haies arbustives / Fascines

L'association d'une haie arbustive et d'une fascine permet d'assurer une efficacité immédiate du dispositif. En effet, à l'installation, une haie jeune, peu dense, ne permet pas de ralentir suffisamment le ruissellement. Une fois la fascine altérée et compactée (après 6 à 7 ans généralement), la haie doit pouvoir prendre le relais.



Photographie 6 : Association d'une bande enherbée, d'une fascine et d'une haie arbustive à Mertzwiller (67), le 10/03/16. Auteurs : B. Friconet.

Bandes enherbées / Fascines / Haies

La présence d'une bande enherbée, de plusieurs mètres, à l'amont d'une fascine assure une efficacité accrue du dispositif, ainsi qu'une durée de vie plus longue de la fascine. Ceci peut être intéressant dans le cas où l'espèce constituant la haie nécessite plusieurs années pour être efficace.

1.2.2. Méthodes de calcul de l'efficacité d'un dispositif d'hydraulique douce

- **Estimation du frein hydraulique par le coefficient de Manning (n)**

L'efficacité d'un dispositif d'hydraulique douce peut être associée à sa capacité à ralentir le ruissellement, suivant les forces de frottement en jeu lors du passage de l'eau. Pour évaluer cette efficacité, le coefficient de Manning (n , en $s/m^{1/3}$) est souvent utilisé, en tant que valeur associée au frein hydraulique d'un obstacle ou d'une surface (Ouvry *et al.*, 2012). Il se calcule en connaissant le rayon hydraulique de l'écoulement (Rh , en m), la vitesse de l'écoulement (V , en m/s) et du gradient d'énergie (p , correspondant à la pente du terrain), à partir de l'équation suivante :

$$V = (1/n) \cdot Rh^{2/3} \cdot p^{1/2}$$

- **Résultats des travaux expérimentaux**

Effets des dispositifs sur le frein hydraulique

L'impact des dispositifs d'hydraulique douce sur le ralentissement dynamique a surtout été étudié dans le cas des haies herbacées (Ouvry *et al.*, 2012 ; Richet *et al.*, 2014). Les études menées par Dabney *et al.* (1995) aux USA. sur des haies herbacées à base de panic érigé, miscanthus, fétuque élevée et vétiver, montrent que la vitesse de sédimentation (V , en m/s) dépend principalement du débit par unité de largeur (q , en m^3/s), de la longueur de sédimentation (L , en m) et de la granulométrie des agrégats transportés (k), selon l'équation suivante :

$$(C_{out} / C_{in}) = \exp (V \cdot Bk \cdot L / q), \text{ avec :}$$

C_{in} : concentration (g/l) en sédiments entrant ;

C_{out} : concentration (g/l) en sédiments sortant ;

Bk : constante dépendante de la fraction granulométrique considérée k .

Pour cette équation, la granulométrie considérée est celle des agrégats et non des particules élémentaires du sol.

Sur la base de ces connaissances, les travaux exploratoires menés par Ouvry *et al.* (2012) à partir d'expérimentations *in situ*, sur différents sites du Pays-de-Caux, ont permis de mieux connaître la fonction hydraulique et d'identifier l'efficacité potentielle des fascines et des haies arbustives. Différents débits ont été testés à l'aide d'un simulateur de ruissellement

(entre 0,5 l/s/ml et 12 l/s/ml) pour différents dispositifs en faisant varier la granulométrie des sédiments entrant. Les résultats montrent que, pour les haies arbustives, les valeurs des coefficients de Manning vont de 0,40 à 0,80 s/m^{1/3} (figure 1), pour des débits spécifiques compris entre 5 et 10 l/s/ml. Toutefois, ces valeurs sont valables pour des haies dont la densité est supérieure à 50 tiges/ml et pour des débits relativement faibles (inférieurs à 10 l/s/ml). Concernant les fascines, le frein hydraulique présente une grande variabilité pour les faibles débits (avec *n* de 0,15 à 2,9 s/m^{1/3}). Pour expliquer cette variabilité, la part du volume des fagots occupée par les tiges, exprimée comme "pourcentage de plein", a été présentée comme le facteur le plus pertinent (figure 1).

	Efficacité sur le ralentissement hydraulique	Coefficient de Manning (s/m ^{1/3})		Proportion volumique de tiges dans le fagot	Qualité du filtre
		Gamme de valeurs	Moyenne		
Fascines	Moyenne	0,3 ≤ n < 0,5	n = 0,4	30 à 40 %	Fagot mal compacté ou détérioré (décomposition ± courts circuits)
	Forte	0,5 ≤ n < 1,0	n = 0,8	40 à 45 %	Fagot bien compacté
	Très forte	1,0 ≤ n < 3	n = 1,2	> 45 %	Fagot très bien compacté ou colmaté par des dépôts
Haies				Nb de tiges / ml	
	Faible	0,06 ≤ n < 0,08	n = 0,07	< 20	
	Moyenne à forte	0,4 ≤ n < 0,8	n = 0,5	> 50	Ou moins de 50, mais avec des débris accumulés devant les tiges (pailles, ...)

Figure 1 : efficacité des haies et fascines suivant les coefficients de Manning et leurs principales caractéristiques (Ouvry et al., 2012)

Interception des sédiments

Les résultats expérimentaux réalisés par Ouvry *et al.* (2012) montrent que, pour tous les types d'obstacles testés (fascines et haies denses), la granulométrie des particules et le débit sont les principaux facteurs agissant sur l'efficacité des obstacles à intercepter les sédiments. Ainsi, pour une granulométrie donnée, le taux de transfert (Exptotal, en %) augmente avec le débit spécifique (Qs, en l/s/ml), selon la formule suivante :

$$\text{Exptotal} = 0,0441 \cdot Q_s \quad (R^2 = 0,74)$$

Cette formule a cependant été vérifiée pour les granulométries assez fines, lorsque les sédiments transportés contenaient moins de 35 % de particules supérieures à 125 µm. En effet, lorsque la proportion de particules supérieures à 125 µm était supérieure à 50 %, les taux de transfert observés restaient inférieurs à 10 % lors des essais (figure 2).

Granulométrie des apports	Situation et processus érosifs	Taux de sédimentation moyen par rapport à la quantité totale des apports	Taux de sédimentation moyen en relation avec la concentration maximale en sortie
Groupe G : correspondant aux MES dont plus de 50 % des particules transportées ont une taille supérieure à 125 µm	Erosion complète d'un volume de sol, sans tri lors de l'arrachement, ni lors du transport = flux d'un écoulement concentré au sein d'une rigole ou d'une ravine	93 à 99 %	89 à 98 %
Groupe F : correspondant aux MES dont moins de 35 % des particules transportées ont une taille supérieure à 125 µm	Erosion diffuse sous pluie peu intense	74 à 91 %	47 à 90 %

Figure 2 : sédimentation des haies et fascines selon les caractéristiques des particules (Ouvry et al., 2012)

- **Des dispositifs d'hydraulique douce aux efficacités comparables**

Les taux de transfert mesurés par Ouvry *et al.* (2012), en prenant en compte les mêmes paramètres (granulométrie des sédiments et débits spécifiques), correspondent à ceux calculés par Dabney *et al.* (1995) pour les haies herbacées. En outre, les mesures de freins hydrauliques calculés par Dabney *et al.* (1995) sont comparables avec ceux des tests réalisés par l'AREAS pour les fascines et haies arbustives, pour la gamme de débit utilisée (figure 3).

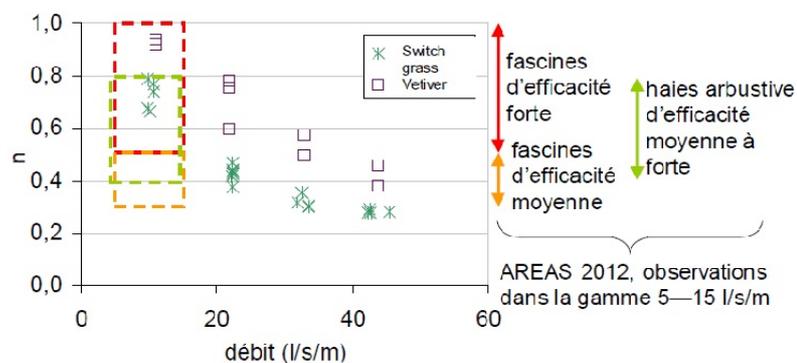


Figure 3 : Coefficients de Manning en fonction du débit par unité de largeur mesurés par l'USDA pour le Switch grass (*Panicum virgatum*) et le vétivier (Dabney *et al.*, 1995) et par l'AREAS pour les fascines et les haies arbustives (Ouvry *et al.*, 2012)

Les mesures de freins hydrauliques réalisées par Richet *et al.* (2014) pour différents types de haies herbacées correspondent également avec ceux mesurés par Ouvry *et al.* (2012) pour les haies et fascines (figure 4).

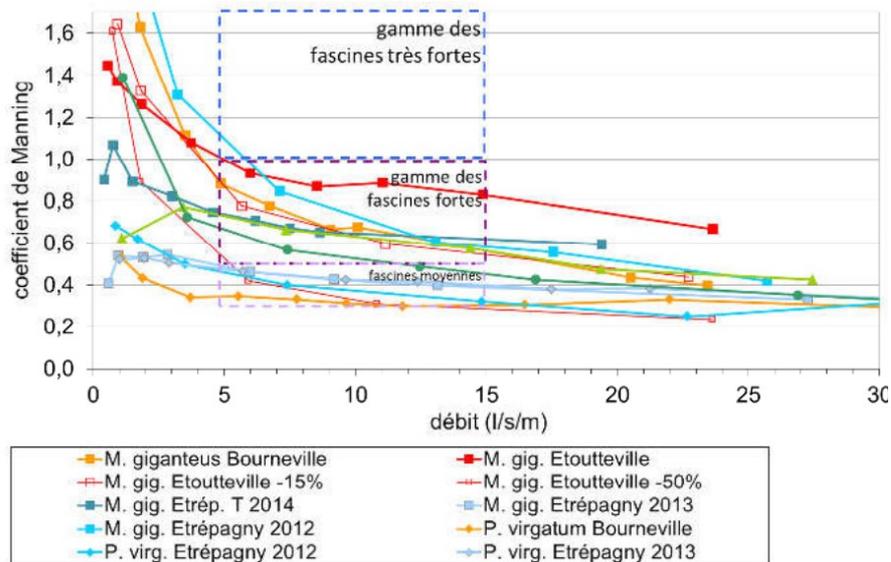


Figure 4 : Coefficients de Manning en fonction du débit par unité de largeur mesurés par Ouvry et al., (2012) pour les fascines et les haies arbustives et par Richet et al., (2014), pour différents types de haies herbacées.

L'érosion hydrique peut donc être quantifiée, à partir de différents outils, en distinguant les flux liquides et les flux solides associés au ruissellement. Le choix des méthodes et des outils dépend à la fois du contexte (pratiques agricoles et occupation des sols), de la région d'étude (associée à différents climats et différents types de sols) et de l'échelle d'analyse (nationale, régionale, locale).

Cette étude vise à mieux comprendre les interactions entre le ruissellement à l'amont et les dispositifs d'hydraulique douce. À ce titre, les expérimentations de l'AREAS ont montré que l'efficacité de rétention en sédiments par les haies arbustives denses est comparable à celle des fascines, les coefficients de *Manning* étant pour la grande majorité, compris entre 0,4 et 0,8 (Ouvry *et al.*, 2012). En outre, cette gamme d'efficacité est similaire à celle des haies herbacées (Richet *et al.*, 2014). Il est donc possible de comparer l'efficacité de deux dispositifs d'hydraulique douce sur la seule base de leurs localisations respectives. Ce travail, présenté en seconde partie, fut réalisé à l'amont du village d'Ettendorf (67), très affecté par les Coulées d'Eaux Boueuses qui sévissent depuis 2003.

2. Rôle des surfaces contributives sur l'efficacité de rétention en sédiments d'un dispositif d'hydraulique douce de type fascine

2.1. Présentation du site d'étude

2.1.1. Contexte régional

Avec 300 communes affectées, l'Alsace est l'une des régions de France les plus touchées par les coulées d'eaux boueuses (Auzet *et al.*, 2005). D'après un recensement effectué pour les deux départements (Bas-Rhin et Haut-Rhin) et les informations archivées depuis 1985, les secteurs les plus affectés sont ceux des collines limoneuses du Kochersberg, de l'Outre Forêt et du Sundgau. Dans ces régions, les orages sont fréquents en mai et juin, période pendant laquelle les sols limoneux, à faible stabilité structurale et sensibles à la battance, sont encore peu couverts par la végétation. En effet, les cultures de printemps, notamment les monocultures de maïs, dont le semis tardif ne permet pas de protéger suffisamment les sols au cours des événements orageux de mai-juin, se sont accentuées ces dernières décennies (Auzet *et al.*, 2005 ; Van Dijk *et al.*, 2009 ; Van Dijk *et al.*, 2015). La cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion en Alsace (Van Dijk *et al.*, 2009 ; figure 5b) montre que les principaux secteurs concernés sont le Sundgau (au Sud), certaines parties du piémont (au centre), le Kochersberg (au Nord), et l'Outre-Forêt (au Nord-Est). Ces secteurs correspondent aux collines limoneuses (figure 1a) également les plus affectées par les coulées d'eaux boueuses.

La commune d'Ettendorf se localise dans une zone sensible à l'aléa érosif (figure 5), entre le piémont Vosgien et les collines limoneuses du Bas-Rhin (67). Proche de l'agglomération strasbourgeoise, cette zone se caractérise notamment par une extension péri-urbaine qui a beaucoup progressé ces dernières décennies, ce qui a contribué à accentuer la vulnérabilité des populations aux coulées d'eaux boueuses.

2.1.2. Ettendorf, une commune particulièrement vulnérable

Située au centre du département du Bas-Rhin (67), entre les collines sous-vosgiennes et les levées limoneuses de la plaine du Rhin, à 30 km au Nord-Ouest de Strasbourg, la commune d'Ettendorf (figure 5) est particulièrement affectée par les coulées d'eaux boueuses qui sévissent dans le village depuis 2003. Plusieurs facteurs peuvent permettre de mieux comprendre les causes du problème.

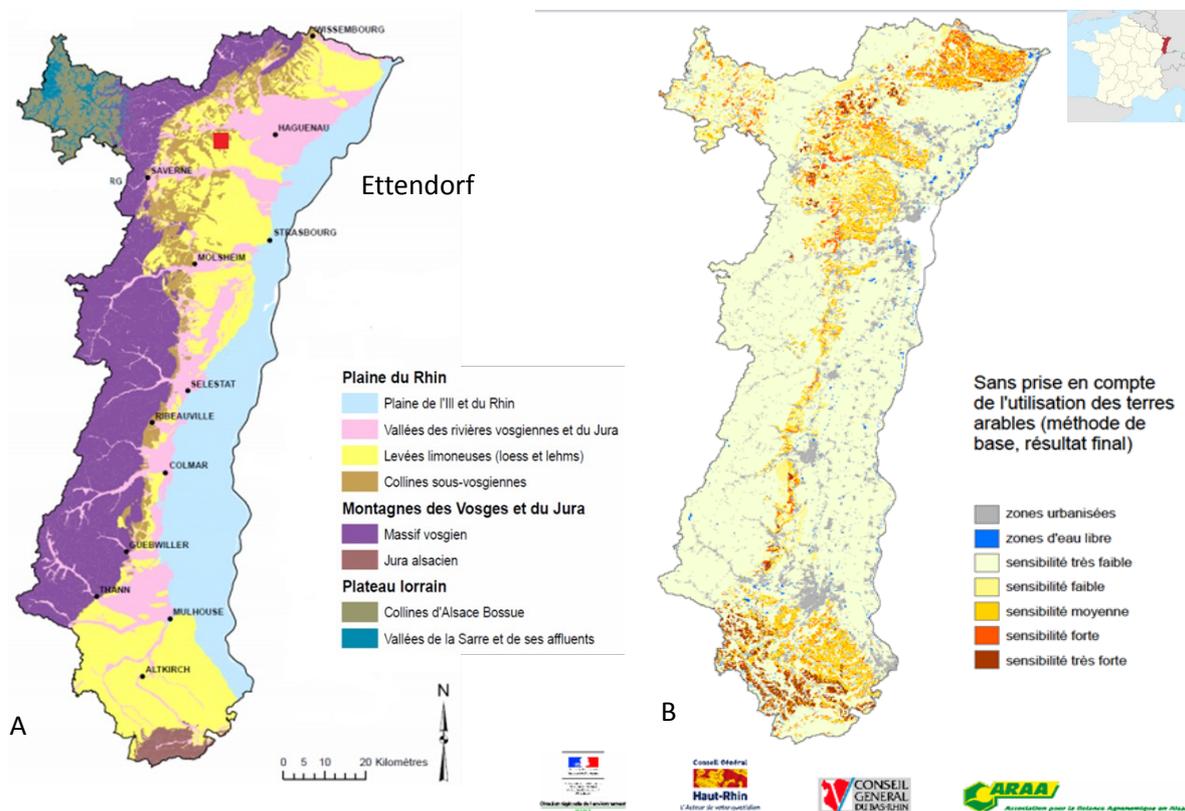


Figure 5 : Grand domaines morphologiques d'Alsace (A ; Muller *et al.*, 2012) et sensibilité des sols à l'érosion d'après la méthode MESALES (B ; Van Dijk *et al.*, 2009)

- **Le rôle des pratiques agro-pastorales et de l'occupation du sol**

Les bouleversements des pratiques agro-pastorales et de l'occupation du sol de ces dernières décennies permettent d'apporter des éléments d'explication au problème. Depuis le début des années 1970, les parcelles n'ont cessé de s'accroître en surface, et de se réduire en nombre. Aujourd'hui, les trois principaux agriculteurs exploitent chacun des surfaces de 70 à 120 hectares, contre en moyenne 5 à 20 hectares pour les autres. Le processus de remembrement s'est accompagné d'une disparition progressive des éléments paysagers tels que les haies et bandes enherbées. Les problèmes ont commencé au printemps 2003, au moment où plus de 90 % des surfaces cultivées étaient composées de maïs, cette culture étant très productive sur le plan agronomique en Alsace. Or, le semis tardif ne permet pas de couvrir le sol suffisamment au moment des épisodes orageux de printemps.

- **Un village à la confluence d'un vaste réseau de vallons secs**

Le village d'Ettendorf est situé à la confluence de deux principaux vallons, dont le principal, celui du Langraben, orienté NE-SO, est drainé par un important réseau de vallons secs (figure 6). Le village est donc le réceptacle d'un réseau complexe de chemins d'eau potentiels en cas d'événement orageux. La zone d'étude, entre les communes d'Ettendorf, de Ringeldorf et de Grassendorf, correspond à la surface contributive du point coté à 201 m, à B. Fricconet

l'entrée du village d'Ettendorf (figure 6). Les interfluves vont de 290 m (Grassendorf) à 270 m (Ettendorf) et les talwegs vont de 200 à 215 m.

2.1.3. Stratégies de lutte contre les coulées d'eaux boueuses

Pour faire face aux coulées d'eaux boueuses, la mairie d'Ettendorf, en concertation avec la chambre d'agriculture d'Alsace, met en œuvre des solutions préventives, visant à maintenir la terre en place au sein des parcelles agricoles, par deux méthodes :

- Des mesures visant à éviter l'érosion des sols. D'abord, par des assolements concertés entre les agriculteurs, pour alterner les cultures. Ensuite, par un changement des techniques culturales, notamment le développement du sans-labour ou le semis direct.
- Des mesures visant à intercepter les sédiments, par l'aménagement de dispositifs d'hydraulique douce. En 2009, plus d'un kilomètre de fascines ont été implantés sur la commune d'Ettendorf (figure 6).

2.1.4. Présentation des dispositifs retenus pour l'étude

À partir de la base de données mise à jour en 2016 par la Chambre d'Agriculture d'Alsace (CARA), l'ensemble des fascines ont été localisées sur le site d'étude. Des sorties de terrain ont permis de présélectionner deux fascines, F1 et F2 (figure 6). Ces dispositifs ont été choisis sur la base de deux principaux critères.

Tout d'abord, l'intérêt étant de comparer l'efficacité de ces dispositifs suivant leurs localisations, une fascine a été retenue à l'aval de la zone d'étude (F1), une autre plus en amont (F2). La première, F1, est susceptible de recevoir des flux concentrés, provenant d'une surface contributive relativement grande. La seconde, F2, en amont de la zone d'étude est susceptible d'intercepter des flux plus diffus, provenant d'une surface contributive relativement réduite (figure 6).

Des observations de terrain ont permis de valider le choix de ces dispositifs sur la base d'un critère associé à l'état des fascines. Il a été convenu de différencier une fascine en bon état de fonctionnement, et une autre, plus dégradée. Bien que l'état des fascines ne sera pas pris en compte pour ce mémoire, ce critère est envisagé pour la suite de l'étude.

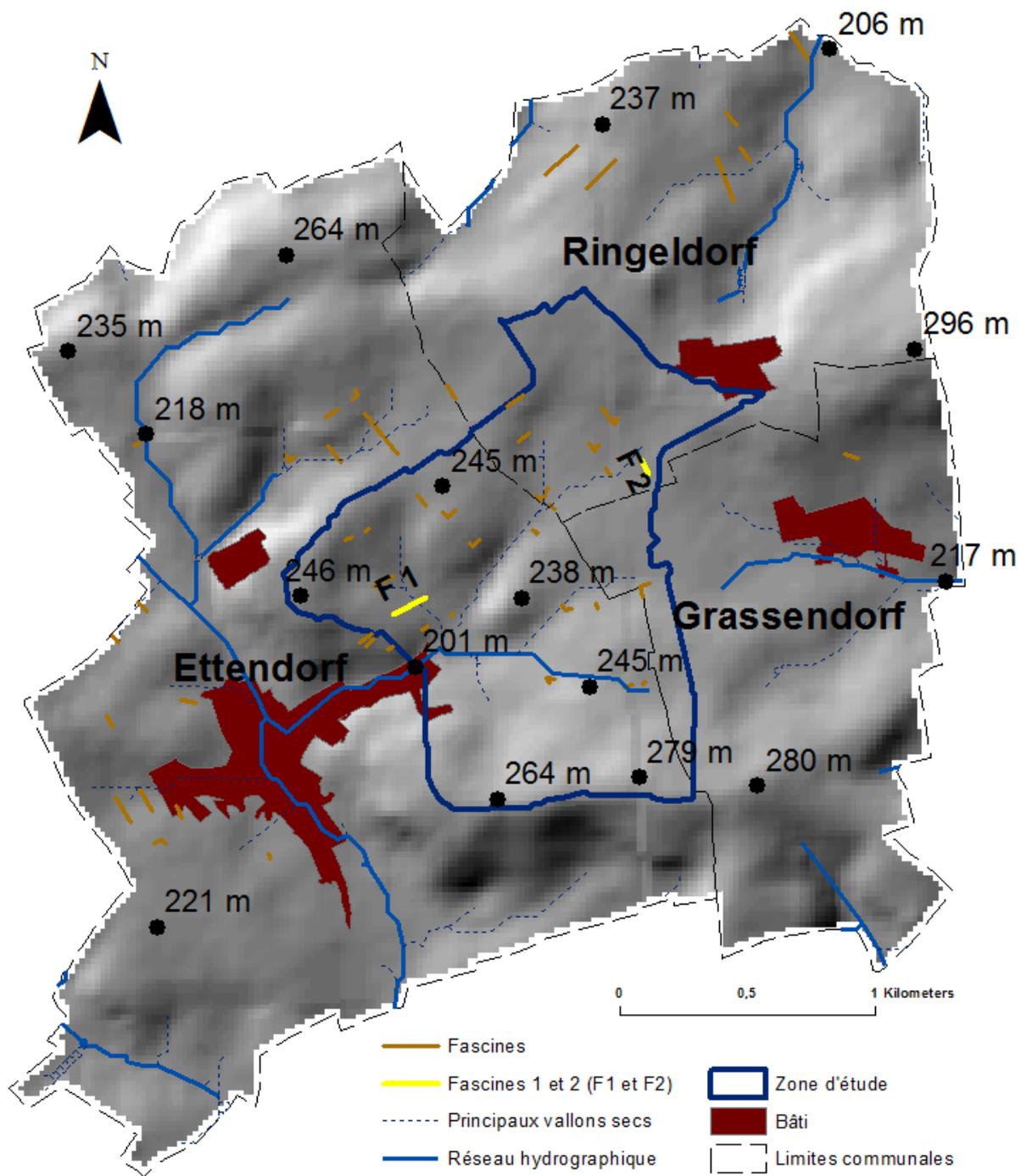


Figure 6 : localisation du site d'étude et des fascines installées en 2009. Source des données : Fascines : CARA (2016) ; Bdtopo : IGN (2012) ; MNT à 20 mètres de résolution : CIGAL.

Les deux dispositifs, installés en 2009, sont dans un état de dégradation déjà bien avancé, comme la plupart des fascines du site d'étude. Cela dit, la fascine 1, bien que compactée et altérée est encore fonctionnelle, le fagot étant peu recouvert par les dépôts (photographie 7). Cette fascine, de 140 mètres, est la plus longue observée sur l'ensemble du site. La fascine 2 (F2) présente un état de dégradation plus avancé, le fagot étant très compacté et altéré (photographie 8).



Photographie 7 : fascine 1 (F1), de 140 m de long, située entre une parcelle de blé (amont) et une parcelle de maïs (aval), Ettendorf, le 18/04/2016. Auteur : B. Friconnet.



Photographie 8 : la fascine 2 (F2), de 60 m de long, à l'amont du site d'étude, présente un état d'altération très avancé. Au second plan, le village de Ringeldorf. Auteur : B. Friconnet, le 18/04/2009.

2.2. Méthode

2.2.1. Démarche de l'étude

La démarche adoptée a été de reconstituer un scénario « agro-pédo-climatique » pour les deux surfaces contributives à l'amont des fascines retenues pour cette étude (F1 et F2). Les paramètres d'entrée du modèle, associés à ces deux surfaces contributives, ont permis d'élaborer les deux scénarios (SC1 et SC2) à simuler par le logiciel VFSSMod (figure 7). Pour chaque scénario, quatre groupes de paramètres ont été intégrés au modèle : les caractéristiques de l'événement pluvieux, la topographie / dimensions des surfaces contributives, le potentiel de génération du ruissellement, et l'érodabilité des sols. Les résultats de ces simulations ont permis d'estimer le ruissellement à l'exutoire de chaque surface contributive (à l'entrée des fascines 1 et 2) ainsi que la quantité et les caractéristiques des sédiments associés. Enfin, l'équation d'Ouvry *et al.* (2012) a été utilisée pour calculer le taux de transfert potentiel et pour estimer l'efficacité des dispositifs d'hydraulique, au regard de la localisation et des caractéristiques de chaque surface contributive à l'amont des deux fascines (figure 7).

2.2.2. Présentation du modèle VFSSMod

VFSSMOD (*Vegetative Filter Strip Modelling System*) est un modèle numérique, à base physique, développé pour simuler, à l'échelle du versant et d'un événement pluvieux, les processus hydrologiques et les transferts sédimentaires au sein d'une bande enherbée (Munoz *et al.*, 2011). Il permet ainsi de calculer l'efficacité d'une bande enherbée à retenir les sédiments et/ou les pesticides associés au ruissellement provenant de l'amont.

En outre, ce modèle permet, à partir des caractéristiques d'un événement pluvieux, de la topographie ainsi que des types et de l'occupation du sol d'une surface contributive, de générer les flux hydro-sédimentaires entrant sur une bande enherbée (ou tout autre dispositif d'hydraulique douce). Pour ce faire, le module UH du modèle VFSSMOD utilise la théorie du *Curve Number* (USDA-SCS, 1972), les données pluviométriques ainsi que l'équation universelle de perte en sols (Wischmeier et Smith, 1978) pour générer trois fichiers, dont un hyéto-gramme de l'événement pluvieux, un hydrogramme de ruissellement et les flux sédimentaires ainsi que leurs propriétés à l'exutoire de la surface contributive utilisée pour la simulation.

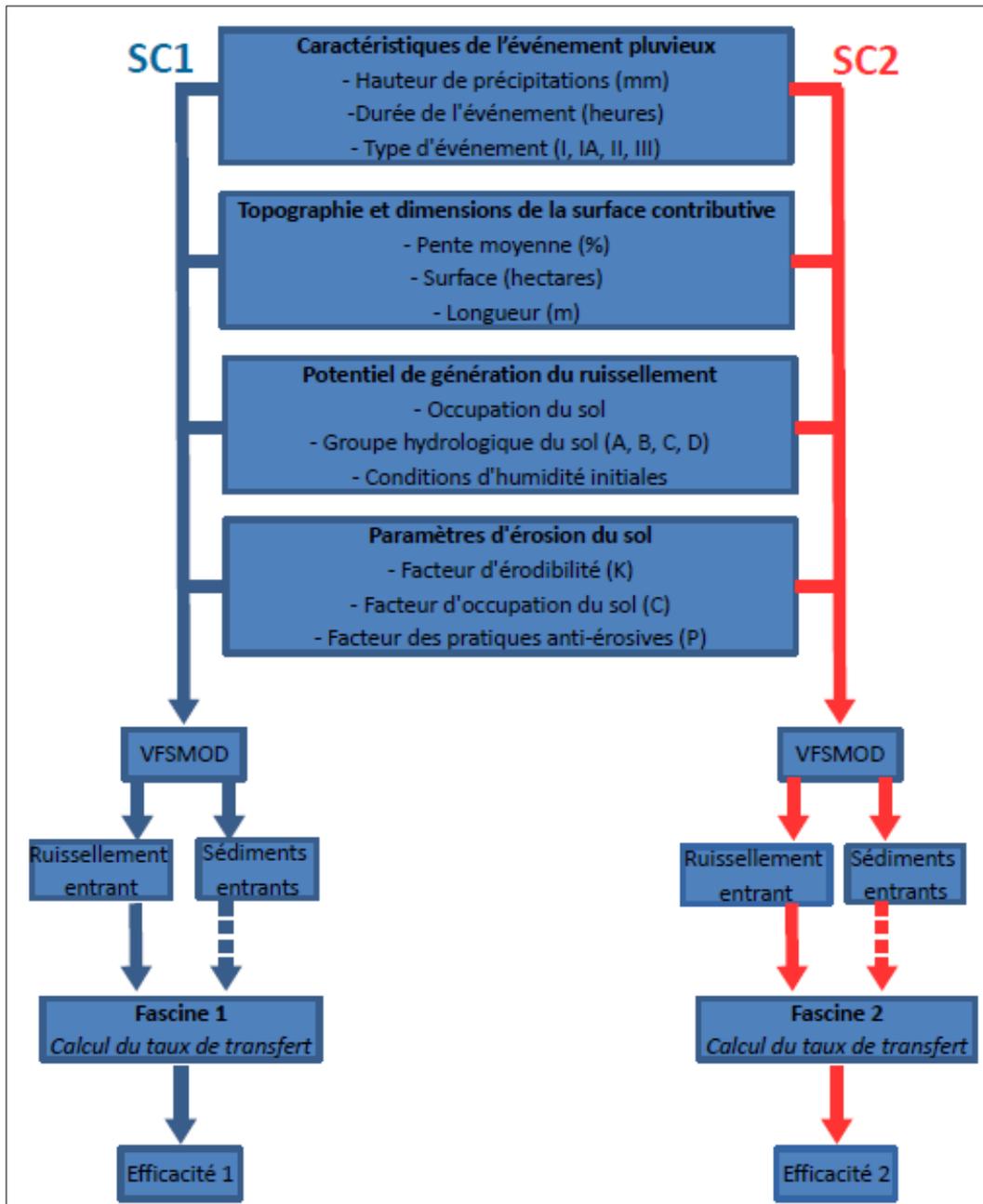


Figure 7 : Scénarios (SC1 et SC2) et paramètres d'entrés utilisés par le logiciel VFSMOD pour simuler les flux hydro-sédimentaires à l'exutoire de deux surfaces contributives

2.2.3. Acquisition des données et paramètres d'entrée du modèle

- **Caractéristiques de l'événement pluvieux**

La hauteur des précipitations (en mm) et la durée de l'événement (en heures) sont utilisées par le modèle VFSSMOD pour simuler l'intensité de l'événement pluvieux. Sur le terrain, un pluviomètre a été installé au niveau de la fascine 1 le 19/04/2016. Au cours des dernières sorties de terrain, des hauteurs de 32 et 53 mm ont été mesurées respectivement les 03/05 et 17/05/2016. Les observations n'ont à ce jour pas encore mis en évidence d'événement érosif ou de coulées d'eaux boueuses sur le site. Les hauteurs, relevées à ce jour, ne sont donc pas le fait d'un événement orageux de forte intensité mais correspondent plutôt au cumul des précipitations d'une semaine. Cependant, il est possible de se baser sur un événement pluvieux typique en Alsace, avec 35 mm de pluie en 30 minutes, suffisant pour provoquer des coulées d'eaux boueuses dans la région. Ces valeurs correspondent à une période de retour de 50 ans, selon l'équation de Montana et les données fournis par l'ENGEEES pour plusieurs stations météo de la plaine d'Alsace (Meylan *et al.*, 2005).

Pour générer le hyétogramme de l'événement pluvieux, le « type d'événement pluvieux » a également été renseigné. Ce paramètre est associé aux types d'événements se produisant sur le territoire américain. Le type I correspond aux régions d'Hawaï et du Sud de la Californie. Le type Ia est utilisé pour simuler les événements typiques des climats océaniques du Nord-Ouest des USA. Le type III représente les événements de la côte atlantique et du Golfe du Mexique. Enfin, le type II est utilisé pour le reste des États-Unis (Munoz *et al.*, 2011). Pour les simulations, le type Ia a été utilisé dans un premier temps, ce dernier étant le plus proche des régions de l'ouest de l'Europe.

- **Topographie et dimensions des surfaces contributives**

La topographie et les dimensions des surfaces contributives retenues pour l'étude sont utilisées par le modèle VFSSMod en tant que facteurs LS (longueur et pente) du modèle universel de perte en sols (Wischmeier et Smith, 1978). Associés au hyétogramme de l'événement pluvieux, ces paramètres sont également utilisés pour générer l'hydrogramme de ruissellement.

Pour réaliser cette étape, des données topographiques à haute résolution, de type LiDAR (à 0,5 mètre de résolution spatiale), acquise en 2013 par la Communauté de Commune de la Basse Zorn et de la Région de Brumath, ont été utilisées. Ces données

recouvrent la quasi-totalité du site d'étude (figure 8). Les chemins d'eau potentiels ont été représentés à partir des données LiDAR, en prenant pour exutoire l'entrée du village d'Ettendorf, au point côté à 201 m. Les surfaces contributives (SC1 et SC2) ainsi que les chemins d'eau à l'amont des deux fascines retenues (F1 et F2) ont aussi été représentés. Cette première étape permet de vérifier la cohérence du choix des deux fascines. La première, F1, est située à l'exutoire d'une surface contributive relativement grande (SC1) et recevant un ruissellement potentiellement concentré. L'autre, F2 est alimenté par une surface contributive bien plus réduite, dont le ruissellement est potentiellement plus diffus.

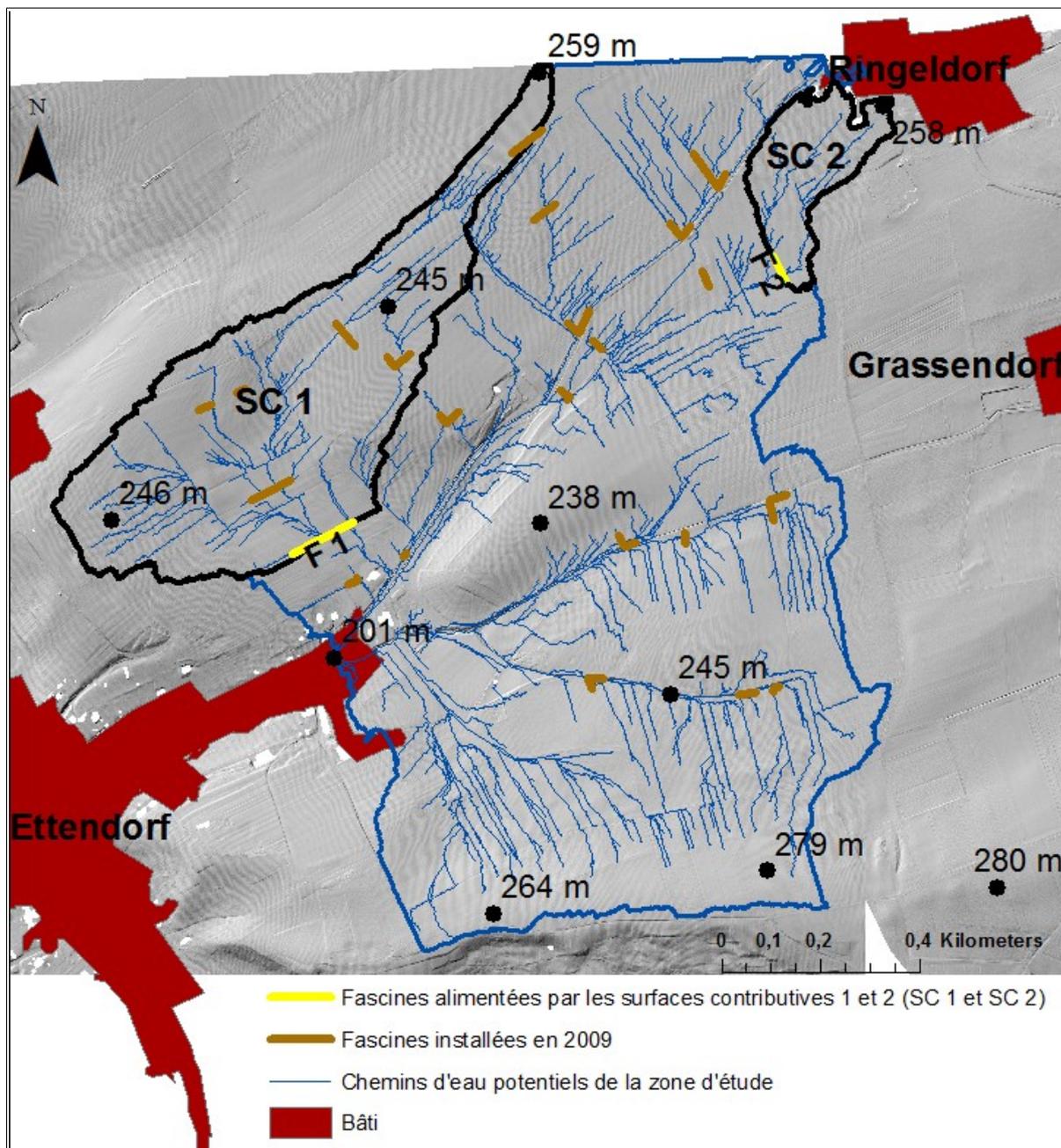


Figure 8 : Chemins d'eau potentiels et aménagements d'hydraulique douce sur l'ensemble de la zone d'étude.
 Source des données : Fascines : CARA (2016) ; Bdtopo : IGN (2012) ; Données LiDAR : CC de la Basse Zorn et de la Région de Brumath.

La fascine 1 (F1) est alimentée par une surface contributive (SC1) de 35,2 hectares dont la pente moyenne est de 6 %. Elle se localise à une altitude de 215 mètres, soit presque la même que le point le plus en aval du site d'étude (201 m). Le point le plus en amont de la surface contributive 1 (SC1), au Nord du site d'étude, se situe à 259 mètre. La longueur de SC1, de 326 mètres, fut calculée à partir de 13 transects tracés depuis l'extrémité des chemins d'eau jusqu'au centre du dispositif.

La fascine 2 (F 2) se localise à une altitude de 244 mètres, en amont du site d'étude. Elle est alimentée par une surface contributive de 5,98 hectares, dont le point le plus haut se localise à 258 mètres (au Nord-Est de la zone d'étude) et dont la pente moyenne est de 4 %. La longueur moyenne des 13 transects tracés depuis l'extrémité des chemins d'eau jusqu'au centre du dispositif (F2) est de 147 mètres.

Scénarios	Paramètres d'entrée du modèle VFSMOD		
	Surface (Hectares)	Longueur (m)	Pentes (fraction de %)
SC 1	35,2	326	0,06
SC 2	5,98	147	0,04

- **Détermination du potentiel de génération du ruissellement**

L'hydrogramme de ruissellement est calculé par VFSMOD à partir de la théorie du *Curve Number* (USDA-SCS, 1972). Le *Curve Number* est un paramètre empirique représentant le potentiel de génération du ruissellement. Il se traduit par une valeur allant de 0 (ruissellement minimal) à 100 (ruissellement maximal). Ce paramètre se détermine à partir de l'occupation du sol, du groupe hydrologique du sol, ainsi que des conditions d'humidité initiales (Carlier *et al.*, 2011).

➤ **Occupation des sols et conditions hydrologiques associées**

L'occupation des sols est prise en compte à travers les conditions hydrologiques associées aux différents états de surface. D'après l'USDA-SCS (1972), les conditions hydrologiques sont favorables lorsqu'elles limitent le ruissellement et favorisent l'infiltration. *A contrario*, elles sont défavorables lorsqu'elles favorisent le ruissellement et limitent l'infiltration (Carlier *et al.*, 2011). D'après l'USDA-SCS (1972), pour les cultures, prairies, pâturages et broussailles, les conditions hydrologiques sont :

- Favorables, lorsque la végétation couvre plus de 75 % de la surface du sol.
- Moyennes, lorsque la végétation couvre 50 à 75 % de la surface du sol.
- Défavorables, lorsque la végétation couvre moins de 50 % de la surface du sol.

Pour les surfaces boisées, les conditions hydrologiques sont :

- Favorables, si la broussaille couvrent le sol.
- Moyennes, si une partie des détritiques couvre le sol.

- Défavorables, si les petits arbres et la broussaille sont détruits.

Les données vectorielles d'occupation du sol, digitalisées par l'ARAA en 2016, ont été représentées sur l'ensemble du site d'étude (figure 9). On peut distinguer les cultures pérennes (vergers, vignes), les cultures annuelles à grand écartement (le maïs) et à petit écartement (le blé), les sols nu, les prairies, les broussailles, les zones boisées et les zones urbaines. Sur la surface contributive 1 (SC1), les grandes cultures représentent 98 % de la surface totale, avec 60 % occupés par les cultures à grands écartement (maïs) et 38 % occupés par les cultures à petits écartements (blé). La part couverte par les prairies, pâturages et vergers ne représente que 1,5 %, et de la surface totale tandis 0,5 % est occupée par des sols nu (figure 9). Dans le cas de la surface contributive 2 (SC 2), la part représentée par les grandes cultures est de 85 %, avec 46 % de cultures à grands écartements et 39 % à petits écartement. La part couverte par les prairies et pâturages est de 3 % et celle concernant les sols nu représente 12 % de la surface totale (figure 9).

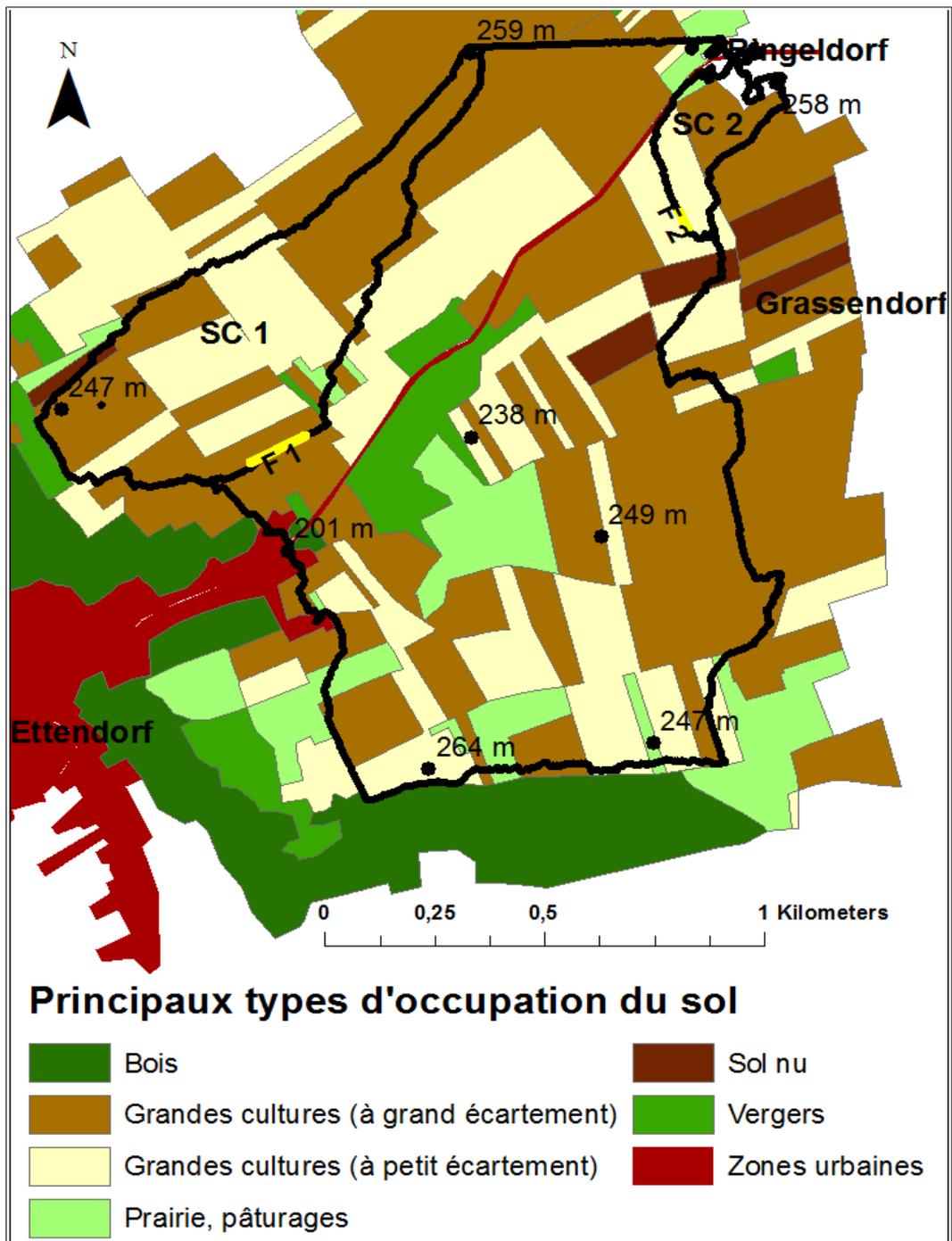


Figure 9 : principaux types d'occupation du sol représentés sur la zone d'étude. Source des données : ARAA, 2016.

➤ Groupes hydrologiques du sol

D'après l'USDA-SCS (1972), les sols peuvent être classés en quatre groupes définis selon leurs capacités d'infiltration, allant de A (pour les sols les plus perméables, notamment les sols sableux) à D (pour les sols les moins perméables, tels que les sols argileux). Ces groupes hydrologiques peuvent être identifiés à partir de la conductivité hydraulique à saturation et de la présence d'une nappe et/ou d'un horizon imperméable, selon les clés de détermination suivante (figure 10) :

Profondeur de la couche imperméable	Profondeur de la nappe superficielle	Ksat de la couche la moins perméable dans le profil indiqué		Groupe
		Profil	Ksat min	
< 50 cm	-	-	-	D
50 à 100 cm	< 60 cm	0 - 60 cm	> 144 mm/h	A/D
		0 - 60 cm	36 à 144 mm/h	B/D
		0 - 60 cm	3.55 à 36 mm/h	C/D
		0 - 60 cm	< 3.55 mm/h	D
	> 60 cm	0 - 50 cm	> 144 mm/h	A
		0 - 50 cm	36 à 144 mm/h	B
		0 - 50 cm	3.55 à 36 mm/h	C
		0 - 50 cm	< 3.55 mm/h	D
> 100 cm	< 60 cm	0 - 100 cm	36 mm/h	A/D
		0 - 100 cm	14.48 à 36 mm/h	B/D
		0 - 100 cm	1.52 à 14.48 mm/h	C/D
		0 - 100 cm	< 1.52 mm/h	D
	60 à 100 cm	0 - 50 cm	> 144 mm/h	A
		0 - 50 cm	36 à 144 mm/h	B
		0 - 50 cm	3.55 à 36 mm/h	C
		0 - 50 cm	< 3.55 mm/h	D
	> 100 cm	0 - 100 cm	36 mm/h	A
		0 - 100 cm	14.48 à 36 mm/h	B
		0 - 100 cm	1.52 à 14.48 mm/h	C
		0 - 100 cm	< 1.52 mm/h	D

Figure 10 : clés de détermination du groupe hydrologique d'un sol d'après l'USDA-SCS, 1972 (Carluer et al., 2011).

- Conductivité hydraulique à saturation (mm/h)

Les règles de pédo-transfert ont été utilisées, à partir de l'outil « *Soil Water Characteristics* » (Saxton et Rawls, 2006). Ce logiciel se base sur la texture, la teneur en matières organiques, le degré de compaction ainsi que de la piérrrosité (% de pierres) des sols d'une surface contributive pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation.

Pour ce faire, les types de sols ont été utilisés, à partir de la base de données vectorielle des sols d'Alsace au 1/250.000ème, réalisée par l'ARAA et Sol-Conseil en 2012 (Muller et al., 2012). Cette dernière permet de localiser le site d'étude et les deux surfaces contributives au niveau des limons argileux (figure 11).

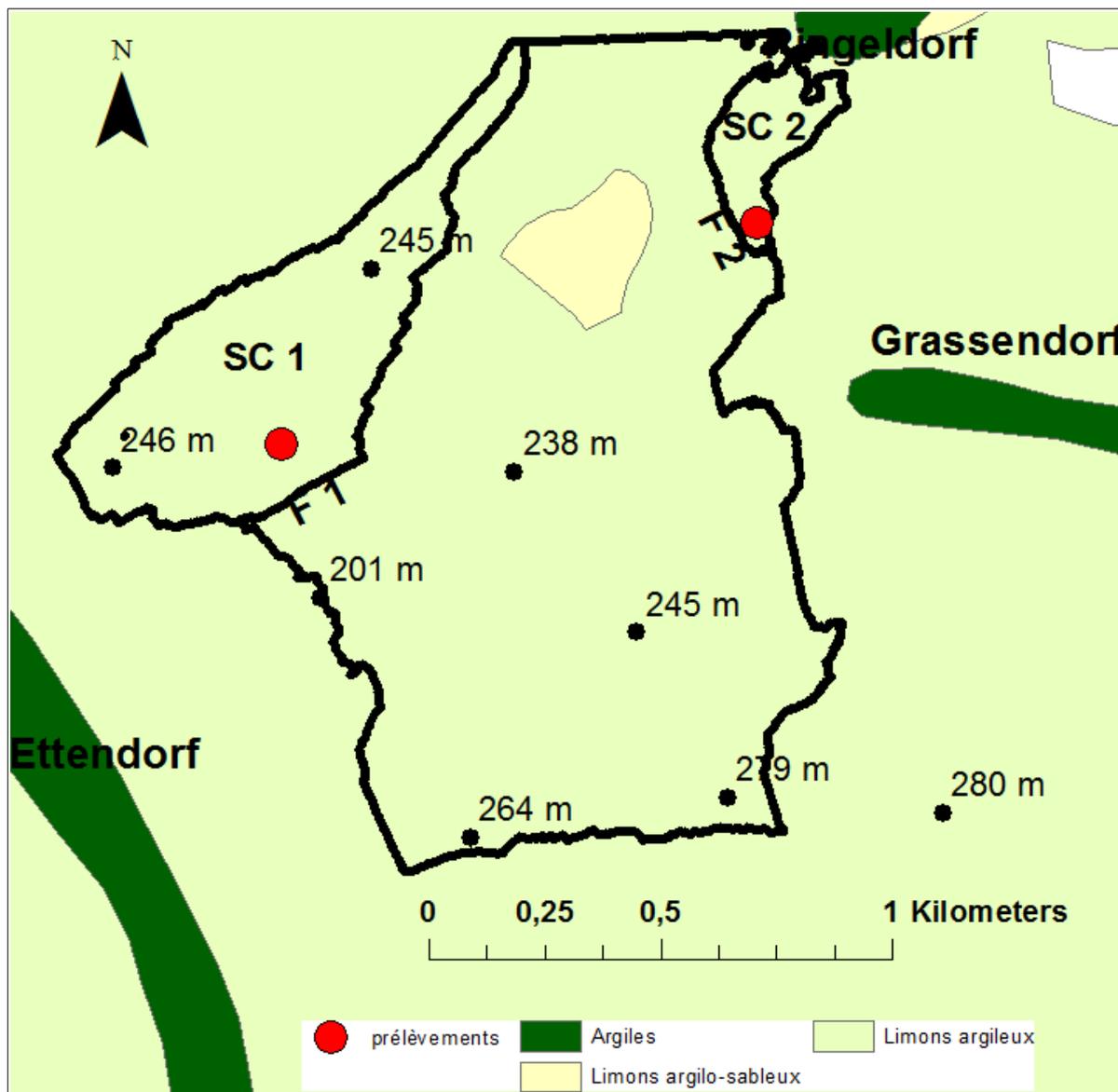


Figure 11 : principaux types de sols localisés sur le site d'étude. Source des données : ARAA (2012).

Des prélèvements à la tarière ont été effectués sur les deux surfaces contributives (figure 11), au niveau de l'horizon superficiel (pour les 15 premiers cm du sol). Des analyses en laboratoire ont permis de renseigner la texture des échantillons prélevés ainsi que la teneur en matières organiques (figure 12). D'après le triangle du GEPPA, le type de sol associé à la texture des deux surfaces contributives correspond aux limons argileux, ce qui est cohérent avec la base de données vectorielle des sols (figure 11). Les niveaux de compaction, ainsi que la pierrosité du sol ont également été appréciés sur le terrain. Le logiciel « *Soil Water Characteristics* » a enfin été utilisé pour déterminer la conductivité hydraulique à saturation à partir des données d'entrées collectées sur le terrain (figure 12).

Scénarios	Argiles (%)	Limons (%)	Sables (%)	Type (GEPPA)	MO (%)	Niveaux de compaction	Piérosité (%)	Conductivité hydraulique à saturation (mm/h)
SC 1	22,6	69,4	8	Limons argileux	2	Faible	0 %	10,97
SC 2	19,7	73,6	6,7	Limons argileux	1,9	Normale	0 %	8,06

Figure 12 : caractéristiques des sols prélevés sur les surfaces contributives 1 et 2 (SC1 et SC2)

- Identification du groupe hydrologique du sol

Des tests d'infiltration ont été réalisés à partir de la méthode de Beerkan (Braud *et al.*, 2005). Les vitesses d'infiltration relevées étaient pour la plupart très supérieures à celles calculées par l'outil « *Soil Water Characteristic* ». De ce fait, la présence d'un horizon imperméable en surface ne fut pas identifiée. En outre, sur les surfaces contributives, largement occupées par des terres cultivées, aucune information ne fait état d'une nappe.

D'après la figure 10, les deux surfaces contributives, SC1 et SC 2, ayant respectivement une conductivité hydraulique à saturation de 10,97 et 8,06 mm/h, une couche imperméable et une nappe toujours au-delà de 100 cm, correspondent au groupe hydrologique C. D'après l'USDA-SCS (1972), ce groupe correspond en effet aux limons argileux (figure 13), types de sols le plus représentatif de la zone d'étude.

Groupe hydrologique	Potentiel de ruissellement	Texture
A	Minimal	Sable
B	Faible	Sol sableux Sable limoneux Sable argileux Sable argilo-limoneux
C	Moyen	Argile limoneuse Argile limono-sableuse Limon argileux Limon argilo-sableux Limon sablo-argileux Limon sableux Sol argilo-sableux
D	Maximal	Argile

Figure 13 : caractérisation des groupes hydrologique selon la texture d'après l'USDA-SCS, 1972, (Carluer *et al.*, 2011).

➤ Détermination du *Curve Number*

La figure 14 présente les *Curve Numbers* pour différents types d'occupation du sol, groupes hydrologiques, et pour des conditions d'humidité initiales moyennes.

Couverture		Conditions hydrologiques	Groupe hydrologique du sol			
			A	B	C	D
Jachère	Sol nu	-	77	86	91	94
	Résidus au sol	Défavorables	76	85	90	93
		Favorables	74	83	88	90
Grandes cultures	Sol nu	-	77	86	91	94
	Cultures à grand écartement (<i>Row crops</i>)	Défavorables	72	81	88	91
		Favorables	67	78	85	89
	Cultures à petit écartement (<i>Small grain</i>)	Défavorables	65	76	84	88
		Favorables	63	75	83	87
Vignes*	Défavorables	57	72	81	86	
	Favorables	34	58	72	79	
Vergers*	Défavorables	57	73	82	86	
	Moyennes	43	65	76	82	
	Favorables	32	58	72	79	
Prairies, pâturages	Défavorables	68	79	86	89	
	Moyennes	49	69	79	84	
	Favorables	39	61	74	80	
Broussailles	Défavorables	48	67	77	83	
	Moyennes	35	56	70	77	
	Favorables	30	48	65	73	
Bois	Défavorables	45	66	77	83	
	Moyennes	36	60	73	79	
	Favorables	30	55	70	77	
Zones urbaines (parkings, maisons...)		-	98	98	98	98

Figure 14 : principales clés de détermination du Curve Number d'après l'USDA-SCS, 1972 (Carluer et al., 2011)

Pour les deux surfaces contributives (SC1 et SC2), l'occupation du sol est hétérogène. Aussi, un *Curve Number* (CN) composite a été calculé, en pondérant les CN à la part de surface occupée par chaque type de culture (figure 15 et 16).

Surface Contributive 1					
Occupation du sol	Conditions hydrologiques	Curve Number	Surface (m ²)	Surface / Surface totale	Curve Number pondéré
Grandes cultures (maïs)	Défavorables	88	21	0,6	52,65
Grandes cultures (blé)	Favorables	83	13,4	0,38	31,69
Prairies	Facorables	74	0,3	0,01	0,63
Vergers	Moyennes	76	0,2	0,01	0,43
Sols nu	-	91	0,2	0,01	0,52
Somme	-	-	35,1	1	85,9

Figure 15 : typologie de l'occupation du sol et Curve Number associé à la surface contributive 1

Surface Contributive 2					
Occupation du sol	Conditions hydrologiques	Curve Number	Surface (m ²)	Surface / Surface totale	Curve Number pondéré
Grandes cultures (maïs)	Défavorables	88	2,75	0,46	40,47
Grandes cultures (blé)	Favorables	83	2,32	0,39	32,2
Prairies	Favorables	74	0,19	0,03	2,35
Sols nu	-	91	0,72	0,12	10,96
Somme	-	-	5,98	1	85,98

Figure 16 : typologie de l'occupation du sol et Curve Number associé à la surface contributive 2

- **Paramètres d'érosion de la surface contributive**

Les paramètres d'érosion de la surface contributive prennent en compte l'ensemble des facteurs associés à l'érodabilité des sols, utilisés par l'équation universelle de perte en sols

(Wischmeier et Smith, 1978), incluant le facteur d'érodabilité (K), le facteur d'occupation des sols (C) et le facteur des pratiques anti-érosives (P).

➤ Facteur d'érodabilité (K)

Le modèle VFSSMOD permet de calculer le facteur d'érodabilité (K), en combinant la texture et le taux de matières organiques, dont les valeurs ont été déterminées au cours des étapes précédentes (*cf.* conductivité hydraulique à saturation, p. 35), à partir de l'équation de Wischmeier et Smith, 1978 :

$$K = 0,1317.[TF.(12.0-OM)+SF+PF], \text{ avec :}$$

TF : Facteur associé à la texture (*Texture Factor*)

OM : Taux de matières organiques (%)

SF : Facteur associé à la structure (*Structure Factor*)

PF : Facteur de perméabilité (*Permeability Factor*)

Pour ce calcul, les valeurs de TF, SF et PF sont paramétrées par VFSSMOD suivant la texture de la surface contributive (Munoz *et al.*, 2011).

➤ Facteur d'occupation des sols (C)

Le facteur C peut être déterminé à partir des principaux types d'occupation du sol présents sur les surfaces contributives. Les valeurs associées à ce facteur correspondent aux niveaux d'exposition des sols à l'érosion, suivant les différents types de couvertures végétales et de la probabilité d'un événement pluvieux de forte intensité. Van Dijk (2001) a proposé des valeurs associées aux types de couverts, pour tous les mois de l'année (figure 17), les plus élevées étant attribuées aux sols peu couverts (jusqu'à 0,94 pour le maïs en mai) et les plus faibles (0,01 pour les prairies) aux types d'occupations les plus couvrants. Cette classification prend également en compte les types d'événements suivant les différents mois de l'année. Par exemple, un facteur élevé est attribué au maïs pour les mois d'avril, mai et juin, périodes favorables aux orages de printemps, pendant laquelle les plants de maïs sont encore peu développés.

Mois	Forêts	Vignes	Prairies	Céréales	Mais	Betteraves	Pommes de terre	Légumineuses	Autres cultures
Novembre	0,005	0,2	0,01	0,314	0,38	0,44	0,32	0,38	0,314
décembre	0,005	0,2	0,01	0,232	0,32	0,38	0,32	0,32	0,232
janvier	0,005	0,2	0,01	0,232	0,32	0,32	0,32	0,32	0,232
février	0,005	0,2	0,01	0,232	0,32	0,32	0,32	0,32	0,232
mars	0,005	0,2	0,01	0,242	0,32	0,32	0,32	0,32	0,242
avril	0,005	0,2	0,01	0,188	0,53	0,85	0,64	0,53	0,188
mai	0,005	0,2	0,01	0,01	0,94	0,85	0,8	0,94	0,01
juin	0,005	0,2	0,01	0,01	0,45	0,25	0,23	0,45	0,01
juillet	0,005	0,2	0,01	0,011	0,1	0,03	0,07	0,1	0,011
août	0,005	0,2	0,01	0,017	0,08	0,03	0,07	0,08	0,017
septembre	0,005	0,2	0,01	0,07	0,08	0,03	0,2	0,08	0,07
octobre	0,005	0,2	0,01	0,28	0,38	0,17	0,38	0,38	0,28

Figure 17 : valeurs du facteur C selon le type de couverture et le mois de l'année. Source : Van Dijk, 2011.

Ces valeurs ont été utilisées pour chaque type d'occupation des surfaces contributives SC1 et SC2, en retenant la moyenne des mois de mai et juin. Pour représenter l'ensemble des couvertures, le facteur C a été pondéré à la surface représentée par chaque type d'occupation, pour SC1 et SC2 (figure 18 et 19).

SC 1					
Occupation du sol	Surface / Surface totale	Facteur C (mai)	Facteur C (juin)	Facteur C moyen	Facteur C pondéré
Grandes cultures (maïs)	0,6	0,94	0,45	0,7	0,42
Grandes cultures (blé)	0,38	0,01	0,01	0,01	0
Prairies	0,01	0,01	0,01	0,01	0
Vergers	0,01	0,01	0,01	0,01	0
Sols nu	0,01	0,94	0,45	0,7	0,01
Somme	1				0,42

Figure 18 : typologie de l'occupation du sol et Facteur C associé à la surface contributive 1

SC 2					
Occupation du sol	Surface / Surface totale	Facteur C (mai)	Facteur C (juin)	Facteur C moyen	Facteur C pondéré
Grandes cultures (maïs)	0,46	0,94	0,45	0,7	0,32
Grandes cultures (blé)	0,39	0,01	0,01	0,01	0
Prairies	0,03	0,01	0,01	0,01	0
Sols nu	0,12	0,94	0,45	0,7	0,08
Somme	1	-	-	-	0,41

Figure 19 : typologie de l'occupation du sol et Facteur C associé à la surface contributive 2

➤ Pratiques agricoles (Facteur P)

Pour cette étude, nous considérons une situation pour laquelle les pratiques agricoles destinées à limiter l'érosion sont négligeables. Il existe de nombreuses fascines installées sur le bassin-versant, mais elles ne font pas l'objet de cette étude. Nous prenons donc la valeur 1, situation la plus défavorable.

- **Bilan des paramètres d'entrée du modèle**

Paramètres d'entrée du modèle VFSSMOD		Scénarios 1	Scénario 2
Caractéristiques de l'événement et du ruissellement	Hauteur des précipitations (mm)	35	
	Durée de l'événement (heures)	0,5	
	Type d'événement	Ia	
	Curve Number	86	
Topographie et dimensions de la surface contributive	Surface (hectares)	35,2	5,98
	Longueur (m)	326	147
	Pente (fraction de %)	0,06	0,04
Paramètres d'érosion de la surface contributive	Type de sol	Limons argileux	
	Taux de matières organiques	2	1,9
	Facteur C	0,42	0,41
	Facteur P	1	

Figure 20 : paramètres d'entrée du modèle VFSSMOD pour les scénarios associés aux surfaces contributives 1 et 2

2.2.4. Estimation de l'efficacité potentielle des dispositifs d'hydraulique douce

- **Calcul du taux de transfert**

Afin d'estimer l'efficacité potentielle des dispositifs d'hydraulique douce, le taux de transfert (Ex_{total} , en %) fut calculé en fonction du débit spécifique (Q_s , en l/s/ml) des deux surfaces contributives (SC1 et SC2) suivant la formule d'Ouvry *et al.*, (2012) :

$$Ex_{total} = 0,0441.Q_s$$

Pour ce calcul, les débits de pointe, pour les deux surfaces contributives (en l/s) ont été rapportés à la longueur effective des exutoires (en m) afin d'obtenir le débit spécifique (en l/s/ml) aux exutoires des deux surfaces contributives (SC1 et SC2).

- **Calcul de l'efficacité de rétention des dispositifs**

Pour estimer l'efficacité réelle de chaque dispositif, la capacité de stockage fut prise en compte. Cette dernière dépend à la fois de la topographie et des dimensions de la fascine.

Pour ce faire, les données topographiques LiDAR, ainsi que la localisation et les dimensions des fascines (longueur et hauteur) ont été utilisés. La hauteur des fagots, de 38 cm en moyenne pour les deux dispositifs, fut mesurée sur le terrain. En outre, la densité des sols, calculée à partir de la texture, du taux de matière organique, et du degré de compaction (Saxton et Rawls, 2006), de 1330 kg/ m³ pour les deux surfaces contributives, à permis de calculer les volumes susceptibles d'être stockés. La longueur de la zone de dépôts fut utilisée en tant que longueur effective pour chaque exutoire, pour le calcul du débit spécifique. Le taux de rétention de chaque fascine fut calculé par le rapport entre la capacité de rétention des fascines, correspondant au volume pouvant être stocké, et le volume des sédiments interceptés à l'amont, calculé à partir du taux de transfert (Ouvry *et al.*, 2012). L'efficacité des dispositifs d'hydraulique douce fut enfin calculée par le rapport entre la quantité de sédiments stockés par les fascines et la quantité de sédiments transportés à l'exutoire des surfaces contributives.

2.3. Résultats

2.3.1. Résultats des flux hydro-sédimentaires à l'exutoire des surfaces contributives

Les simulations ont permis d'estimer, minutes par minutes, les débits liquides à l'exutoire des deux surfaces contributive (figure 21). Au total, le volume d'eau ruisselé s'élève à 3730 m³ à l'exutoire de la surface contributive 1 (SC1) contre 634 m³ à l'exutoire de la surface contributive 2 (SC2). Pour les deux surfaces contributives, la hauteur d'eau ruisselé s'élève à 10,6 mm, ce qui correspond, pour une hauteur de précipitation de 35 mm, à un coefficient de ruissellement de 30 %. Pour SC1, la concentration en sédiments est de 41,2 g/l, pour 153,7 tonnes de sédiments exportés jusqu'à l'exutoire, contre 14,5 g/l pour SC2 et 5,98 tonnes de sédiments exportés. À partir de ces concentrations et de l'hydrogramme de ruissellement, il fut possible de calculer les débits solides en fonction du temps, à l'exutoire de chaque surface contributive (figure 21).

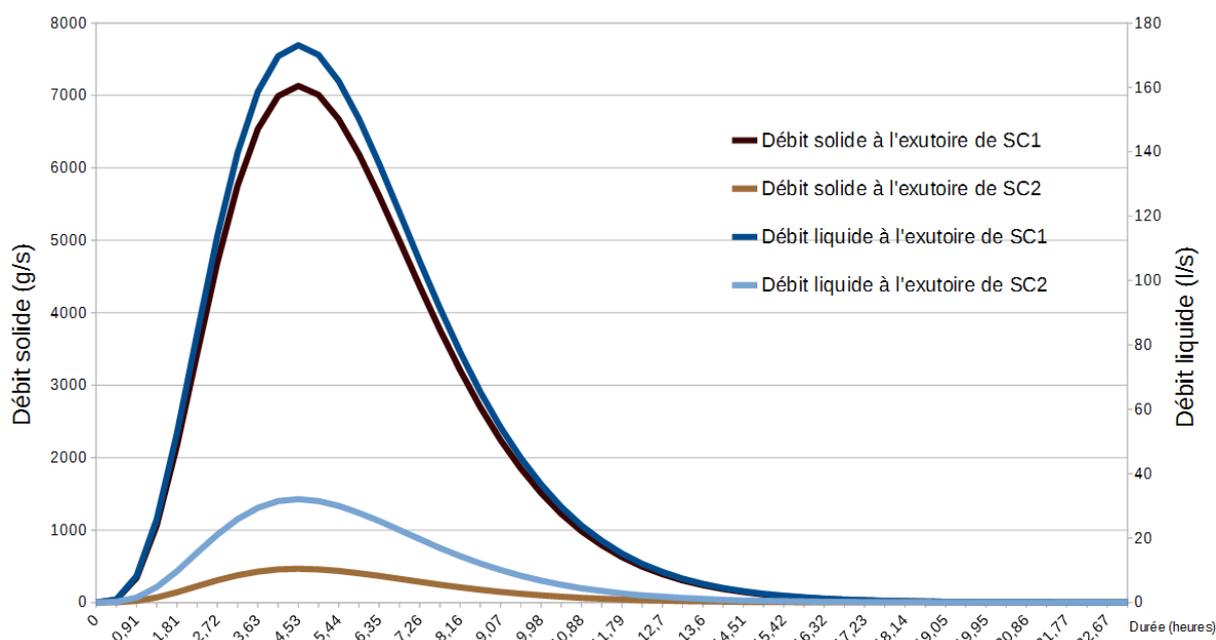


Figure 21 : résultats des débits solides et liquides, simulés à partir du modèle VFSMOD à l'exutoire des surfaces contributives SC1 et SC2

Le volume total du ruissellement simulé aux exutoires est proportionnel à la taille des surfaces contributives, soit six fois plus important pour SC1. En effet, le même événement pluvieux et le même *Curve Number*, principal paramètre influençant le ruissellement, ont été simulés pour les deux scénarios (cf figure 20, p. 41). En revanche, la concentration en sédiments associée au ruissellement de SC1 est près de trois fois plus importante que celle associée au ruissellement de SC2. Le débit solide maximale pour la surface contributive 1 est de 7132 g/s, alors qu'au même

moment, 4h30 après le début du ruissellement, celui de la surface contributive 2 est de 465 g/s, soit près de 16 fois moins important. Les paramètres d'érosion de la surface contributive étant très similaires pour SC1 et SC2 (*cf.* figure 20, p. 41), cette différence peut s'expliquer par la topographie et les dimensions des deux surfaces contributives. Les pertes en sols sont calculées sur la base de la formule de Wischmeier et Smith (1978), incluant le facteur LS, qui combine l'inclinaison et la longueur de la pente moyenne. Ce modèle fut mis en œuvre à l'échelle de la parcelle, pour des petites surfaces et des faibles pentes. Les pentes moyennes simulées sont relativement similaires à celles utilisées pour la mise en œuvre du modèle. En revanche, les longueurs des surfaces, de 321 mètres pour SC1 et 147 mètres pour SC2, très supérieures à celles utilisées pour représenter une parcelle, peuvent justifier l'importance de ces différents taux de concentration en sédiments entre les deux surfaces contributives.

2.3.2. Évaluation de l'efficacité des dispositifs

- **Calculs des taux de transfert sédimentaire**

Les débits spécifiques (en litres/secondes/mètres linéaires) ont été calculés en utilisant le débit de pointe (en l/s). Ce dernier permet de se placer dans la situation la plus défavorable. Tout comme pour les débits solides, le débit de pointe se manifestent 4h30 après le début du ruissellement (figure 21). Il est respectivement de 173 l/s et de 32 l/s pour les surfaces contributives SC1 et SC2. La longueur des exutoires, déterminée suivant les dimensions de la zone de dépôt à l'amont des fascines, est respectivement de 80 mètres pour SC1 et 43 mètres pour SC2. En rapportant le débit de pointe à cette longueur effective, on obtiens des débits spécifiques de 2,16 l/s/ml à la sortie de la surface contributive 1 et de 0,74 l/s/ml à la sortie de la surface contributive 2. Les taux de transferts en sédiments, calculés à partir du débit spécifique suivant l'équation d'Ouvry *et al.*, (2012), sont de 10 % au passage de fascine 1 et de 3 % pour la fascine 2 (figure 22).

Surfaces contributives	Surfaces (Ha)	Volume d'eau ruisselé (m ³)	Coefficient de ruissellement	Débit de pointe (l/s)	Longueur de l'exutoire (m)	Débit spécifique (l/s/ml)	Taux de transfert (%)
SC1	35,2	3730	30 %	173	80	2,16	10
SC2	5,98	634		32	43	0,74	3

Figure 22 : Principales caractéristiques des flux et taux de transfert des surfaces contributives SC1 et SC2

Les taux de transferts calculés résultent directement des débits spécifiques. Cette différence est liée à la superficie des surfaces contributives, l'impluvium de SC1 étant près de six fois plus important que celui de SC2. Aussi, malgré la longueur de l'exutoire de SC1, de 80 mètres, son débit spécifique est près de trois fois plus important que celui de SC2, dont l'exutoire est long de 43 mètres.

La granulométrie des particules associées au ruissellement étant l'un des paramètres les plus influents sur l'efficacité des dispositifs (Dabney *et al.*, 1995 ; Ouvry *et al.*, 2012) cette formule est valable pour comparer l'efficacité de deux dispositifs à condition d'utiliser la même granulométrie pour les deux surfaces contributives amont, ce qui est le cas pour les deux scénarios, les mêmes textures ayant été paramétrées (figure 20). En outre, la formulation d'Ouvry *et al.*, (2012) fut vérifiée pour des granulométrie fines, lorsque les sédiments transportés contiennent moins de 35 % de particules supérieures à 125 micromètres. Cette granulométrie correspond à la taille des agrégats, et non à celle des particules (Ouvry *et al.*, 2012). Dans le cas de ces simulations, il ne fut pas possible de vérifier ces taux associés à la taille des agrégats. En revanche, les même textures (limon argileux) ayant été utilisées pour les deux surfaces contributives, la granulométrie moyenne des particules est 25 micromètres pour SC1 et SC2 (figure 22). Cette granulométrie correspond à des particules relativement fines, susceptibles d'être adaptées aux conditions expérimentales d'Ouvry *et al.*, (2012). De plus, pour être valable, cette formulation s'applique aux débits relativement faibles, la validation ayant été réalisée pour des volumes inférieurs à 10 l/s/ml. Dans les deux cas, les débits spécifiques utilisés sont très inférieurs aux conditions expérimentales d'Ouvry *et al.* (2012), ce qui permet de confirmer la validité de cette formule pour déterminer l'efficacité potentielle des dispositifs.

Ces premiers résultats ne prennent pas en compte la concentration en sédiments, cette dernière étant un paramètre peu influant pour calculer les taux de transferts (Dabney *et al.*, 1995 ; Ouvry *et al.*, 2012). Cependant, pour des événements orageux affectant des surfaces aussi grandes que celles utilisées pour ces simulations, la quantité de sédiments exportés jusqu'à l'exutoire joue un rôle de premier ordre sur la capacité de rétention des dispositifs, comme nous le verrons par la suite.

- **Taux de rétention des sédiments**

D'après les taux de transfert calculés, 138,31 tonnes de sédiments sont susceptibles d'être interceptés par fascine 1, contre 8,91 tonnes par la fascine 2. Toutefois, ce taux de transfert n'est pas suffisant pour déterminer l'efficacité des fascines. En effet, au vu des importantes quantités de sédiments susceptibles d'être interceptés, il convient de prendre en compte la capacité de stockage.

Les calculs de la capacité de stockage des fascines, réalisés à partir d'une hauteur de fascines de 0,38 m, en utilisant les données topographiques de type LiDAR, sont très dépendants de la localisation des dispositifs. Ainsi, la fascine 1 étant excentrée du talweg, sa capacité de stockage fut d'abord estimée à une valeur marginale, inférieure à 1 m³. Pour assurer une cohérence à l'étude et représenter au mieux l'efficacité des dispositifs, lorsque ces derniers sont installés dans l'axe du ruissellement, il fut donc convenu, pour les résultats présentés ci-après, de digitaliser la fascine 1 au centre du talweg, en assumant le caractère virtuel de cette nouvelle localisation.

Pour 1330 m³ / kg, les volumes de sédiments interceptés, calculés à partir du taux de transfert, sont de 104 m³ à l'amont de la fascine 1 et de 6,7 m³ pour la fascine 2. La capacité de stockage à l'amont de la fascine 1 fut estimée à 64 m³, et à 17 m³ à l'amont de la fascine 2. Finalement, le rapport entre la capacité de stockage et le volume de sédiments interceptés permet de calculer le taux de rétention en sédiments, soit 62 % pour fascine 1, et de 100 % pour la fascine 2. La fascine 2 permet donc de stocker l'ensemble des sédiments interceptés d'après la formule d'Ouvry *et al.*, (2012), soit 6,7 m³, tandis que la fascine 1 n'en stock que 62 %, soit 64 m³ (figure 23).

	Sédiments à l'exutoire (tonnes)	Taux de transfert (%)	Sédiments transférés (tonnes)	Sédiments interceptés (tonnes)	Volume des sédiments interceptés (m ³)	Capacité de stockage (m ³)	Taux de rétention (%)	Sédiments stockés (m ³)	Efficacité du dispositif (%)
SC1	153,682	10	15,37	138,31	104	64	62	64	55
SC2	9,188	3	0,28	8,91	6,7	17	100	6,7	97

Figure 23 : Principaux flux et stocks sédimentaires associés aux deux scénarios à l'exutoire des surfaces contributives 1 et 2

Pour une quantité de sédiments transportée donnée, l'efficacité du dispositif dépend donc à la fois du taux de transfert, déterminé suivant la formule d'Ouvry *et al.*, (2012), de la quantité de sédiments transportée jusqu'à l'exutoire, ainsi que de la capacité de stockage des fascines. Aussi, le rapport entre la quantité de sédiments à l'exutoire, 153,682 tonnes pour SC1 et 9,188 tonnes pour SC2, et la quantité de sédiments stockés, 85,12 tonnes à l'amont de la fascine 1 et 8,91 tonnes à l'amont de la fascine 2, définit l'efficacité finale des dispositifs à intercepter les sédiments, soit 55 % pour la fascine 1 et 97 % pour la fascine 2.

- **Importance de la localisation et bilan des efficacités**

Les mêmes paramètres d'érosion et de précipitation ont été utilisés pour les deux scénarios. De plus, les coefficients de ruissellement sont les mêmes pour les deux surfaces, le même

Curve Number, ayant été déterminé. Suivant le facteur LS du modèle de Wischmeier et Smith (1978), c'est donc la configuration topographique et les dimensions des surfaces contributives qui permet d'expliquer les différentes efficacités des fascines. Au vu des résultats, c'est la capacité de stockage, ainsi que la quantité de sédiments à l'exutoire qui influe le plus sur l'efficacité du dispositif 1, situé à l'aval de la zone d'étude. *A contrario*, c'est le taux de transfert, dépendant du débit spécifique, qui détermine l'efficacité du dispositif 2, situé à l'amont. En effet, la superficie de SC2, de 5,98 hectares, est relativement réduite, et les faibles pentes limitent la concentration du ruissellement et l'érosion associée, tandis que la capacité de stockage permet de retenir tous les sédiments interceptés. À l'inverse, la superficie de la surface 1 (35,2 ha), associée à une pente plus importante, favorise le ruissellement, les transferts sédimentaires et une concentration des flux à l'exutoire, avec des volumes trop importants pour être stockés à l'amont de la fascine, dont la hauteur est de 38 cm.

Sur l'ensemble de la surface contributive 1 (SC1), 153,7 tonnes/ha de sédiments ont été transportés jusqu'à l'exutoire. Suivant l'efficacité de la fascine 1, 69 tonnes, soit 2 tonnes/ha sont exportés. Concernant la surface contributive 2 (SC2), 9,2 tonnes soit 1,5 tonnes/ha de sédiments sont transportés jusqu'à l'exutoire. 3 % des sédiments sont exportés de SC2, soit 0,28 tonnes pour 0,05 tonnes/ha (figure 24).

	Sédiments exportés				Taux d'exportation (%)
	Sans fascine		Avec fascine		
	Masse (t)	Masse (t/ha)	Masse (t)	Masse (t/ha)	
SC 1	153,682	4,366	69,16	1,96	45
SC 2	9,188	1,5365	0,28	0,05	3

Figure 24 : bilan de l'efficacité des fascines 1 et 2, d'après les débits solides simulés par *VFSMOD* à l'exutoire des surfaces contributives 1 et 2 (SC1 et SC2), les taux de transfert calculé à partir de l'équation d'Ouvry *et al.*, (2012) et la capacité de stockage à l'amont des fascines.

2.4. Conclusion

D'après les résultats, la fascine localisée à l'amont du site d'étude permet de retenir 97 % des sédiments exportés à l'exutoire, contre 55 % pour la fascine la plus en aval. En considérant les mêmes paramètres pour l'événement pluvieux, les types de sols et l'occupation des sols, ces résultats s'expliquent par la localisation mais aussi par les dimensions des dispositifs d'hydraulique douce. La localisation détermine l'efficacité potentielle des dispositifs d'hydraulique douce suivant deux principaux facteurs. D'une part, elle a une forte incidence sur les flux hydro-sédimentaires transportés jusqu'à l'exutoire. D'autre part, elle détermine en partie la capacité de stockage des fascines, du fait de la topographie du talweg. Les débits spécifiques et la quantités des flux sédimentaires associés sont très dépendants des dimensions et de la topographie des surfaces contributives, les simulations étant basées sur l'équation de Wischmeier et Smith (1978). Située à l'aval de la zone d'étude, à l'exutoire d'une surface contributive de 35,2 hectares la fascine 1 reçoit près de 154 tonnes de sédiments et un volume d'eau de 3730 m³. Cette dernière est localisée trop en aval pour pouvoir gérer les flux sédimentaires entrants au cours d'un seul événement érosif, sa capacité de stockage ne permettant de retenir que la moitié des sédiments entrant sur le dispositif. Plus en amont, à l'aval d'une surface contributive de 9 hectares, la fascine 2 capte et stock la quasi-totalité des sédiments exportés à l'exutoire.

Ces résultats permettent de confirmer une meilleure efficacité lorsque les dispositifs sont localisés à l'amont d'un bassin-versant, pour des faibles débits spécifiques et des flux diffus. La plupart des études ont par ailleurs montrées que ces ouvrages ont une efficacité accrue lorsqu'ils sont localisés au plus proche des zones à l'origine de l'érosion (Dabney *et al.*, 1995, Ouvry *et al.*, 2012, Richet *et al.*, 2014), en amont des bassins versants. Toutefois, afin de valider la cohérence de ces résultats, il sera possible, pour la suite de l'étude, de comparer les flux hydro-sédimentaires générés par *VFSMOD* avec ceux du modèle *LISEM*, utilisé par l'ARAA à l'échelle du bassin-versant.

Les résultats montrent que la capacité de stockage dépend aussi des dimensions du dispositif d'hydraulique douce, la longueur de ces derniers permettant de calculer les débits spécifiques et la hauteur du fagot (ainsi que la longueur des fascines) permettant de calculer le volume susceptible d'être stocké à l'amont. Pour cette étude, la longueur des fascines n'influence pas la capacité de stockage, ces dernières étant plus longues que la zone de dépôt, calculée à partir des données LiDAR. En outre, afin de mettre en évidence le rôle de la localisation, il fut convenu d'utiliser les mêmes hauteurs de fascine, soit 38 cm, correspondant à la hauteur moyenne des fagots mesurés sur le terrain.

Pour la suite de l'étude, les dimensions et les caractéristiques propres à chacun des dispositifs ont été intégrés pour calculer leurs efficacités respectives. Il fut également possible d'attribuer un coefficient de *Manning* adapté aux propriétés de la couverture végétale, aux états de surface, et aux propriétés du sol de différents dispositifs d'hydraulique douce dans le Bas-Rhin. Ce travail fait l'objet de la troisième partie du rapport.

3. Évaluation de l'efficacité de rétention en sédiments par différents dispositifs d'hydraulique douce dans le Bas-Rhin

Au cours de la seconde partie, il fut possible d'estimer l'efficacité d'un dispositif d'hydraulique douce en connaissant les débits liquides provenant d'une surface contributive et sa capacité de stockage. Cette efficacité fut évaluée en considérant un dispositif de type fascine. Toutefois, le ralentissement hydraulique provoqué par un obstacle dépend aussi des caractéristiques de ce dernier (densité de tiges, états de surface, propriétés du sol...). L'objet de cette partie est de proposer une méthodologie visant à déterminer l'efficacité de différents dispositifs d'hydraulique douce à retenir les sédiments, sur la base de leurs caractéristiques.

Ce travail consiste dans un premier temps à identifier les différents sites d'étude, suivant des critères qui mettent en jeu les caractéristiques de la surface contributive et celles des dispositifs d'hydraulique douce. Ensuite, un protocole de terrain fut élaboré, au regard des différentes modalités retenues. Enfin, ces données collectées ont alors été utilisées pour calculer le frein hydraulique et la capacité de transport associée à chacun des dispositifs.

3.1. Présentation des dispositifs d'hydraulique douce

Au cours de la seconde partie, il fut possible de constater l'influence majeure des caractéristiques associées à une surface contributive sur l'efficacité d'un dispositif d'hydraulique douce. De ce fait, la comparaison de l'efficacité de différents dispositifs n'est possible que pour des surfaces contributives amont similaires sur le plan topographique, pédologique, climatique et ayant une occupation et un travail du sol comparable. Ces conditions étant très difficiles à respecter, il convient davantage de comparer l'efficacité de différents dispositifs à l'aval d'une seule et même surface contributive. Pour cette raison, cette étude fut d'abord menée sur le site de Schwindratzheim, aménagé par la CARA en partenariat avec l'ARAA en 2013.

3.1.1. Le dispositif vitrine d'aménagements d'hydraulique douce de Schwindratzheim

Le site de Schwindratzheim rassemble 9 différentes modalités à l'aval d'une seule et même parcelle. Sur la figure 25, les chiffres correspondent aux différentes modalités qui se distinguent suivant le type de dispositif et les espèces présentées sur la figure 26.

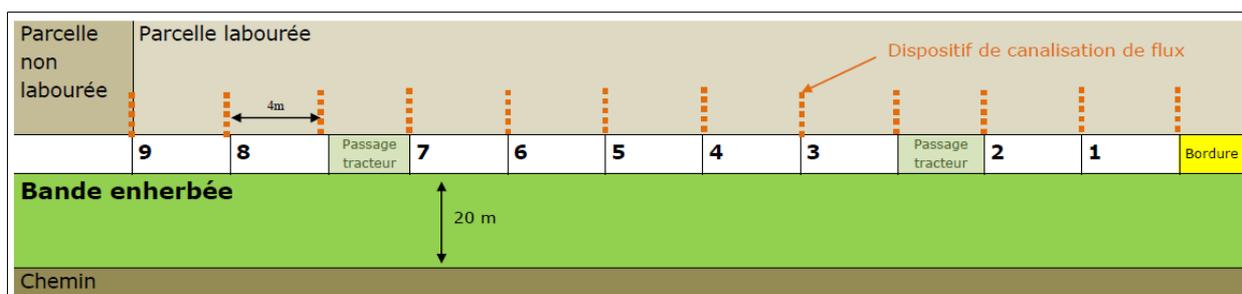


Figure 25 : schéma des dispositifs d'hydraulique douce installés à Schwindratzheimen en 2013. Source : Claire Cugnière, CARA, 2015.

Modalités	9	8	Tracteur	7	6	5	4	3	Tracteur	2	1
Type	Herbe	Fascine morte		Miscanthus	Canisse vivante	Haie arbustive basse	Canisse morte	Haie arbustive basse		Fascine vivante	Haie arbustive
Espèces	Mélange agriculteur			Giganteus	Troènes communs (40)	Aubépine commune (12) Prunelier (12)		Groseillier sauvage (12) Cornouiller sanguin (12)		Noisetier commun (12) Fusain d'Europe (12)	Eglantier commun (8) Cornouiller sanguin (8) Prunelier (8)

Figure 26 : description des dispositifs d'hydraulique douce installés à Schwindratzheimen. Source : Claire Cugnière, CARA, 2015.

Ce site fut aménagé afin de répondre à trois principaux objectifs.

D'abord, il permet de compléter les connaissances associées aux méthodes d'implantation, d'entretien, à la pérennité et aux coûts (installation et entretien), au regard des différentes modalités et essences installées. Cette démarche est ainsi réalisée sur plusieurs années, de façon à suivre le développement des espèces.

Ensuite, l'une des principales fonctions, qui fait l'objet de cette partie, est de mesurer l'efficacité de chacune des modalités à retenir les sédiments, en cas d'événement orageux. Pour cela, les modalités ont été installées à l'aval d'une parcelle dont les configurations topographiques sont relativement homogènes. Des plaques destinées à canaliser les flux ont été installées entre chaque modalité, soit tous les 4 mètres, ce qui permet d'assurer une distribution hydro-sédimentaire homogène. Un pluviomètre, ainsi qu'un capteur d'humidité ont été installés sur ce dispositif vitrine.

Enfin, en tant que site vitrine, le dispositif doit permettre de présenter aux acteurs de terrain et aux élus différentes méthodes d'implantation, d'entretien et coûts de ces dispositifs, ainsi que leurs efficacités à retenir les sédiments, en cas d'événement orageux.

S'agissant d'un site de présentation, installé en 2013, les plants sont encore jeunes et peu développés. De ce fait, l'efficacité de ces derniers dépend principalement de la végétation auxiliaire qui s'installe aux pieds des haies. En outre, cette année (2016), la culture de betterave en non-labour sur la parcelle amont limite fortement le ruissellement et l'érosion. Afin de disposer d'une panoplie de modalités plus anciennes, et pour augmenter les chances d'observer des dépôts à l'amont des dispositifs, le choix fut de diversifier les modalités, sur plusieurs sites du Bas-Rhin.

3.1.2. Choix et présentation des autres sites étudiés dans le Bas-Rhin

- **Critères de choix des dispositifs d'hydraulique douce**

Les dispositifs ont été choisis suivants des critères associés à la configuration de leurs surfaces contributives à l'amont, et leurs particularités (densité de végétation, espèces, localisation...) présentés ci-après.

Critères des surfaces contributives à l'amont des dispositifs

Afin de retenir les sites d'étude, plusieurs critères ont été évalués. La surface contributive devait être favorable au ruissellement érosif. De ce fait, la priorité fut d'identifier, dans la mesure du possible, les parcelles dont les surfaces ne sont pas couvertes par la végétation permanente, ou par une culture d'hiver. Le plus intéressant fut d'identifier des parcelles de maïs en amont du dispositif, ce dernier étant semé à partir d'avril, le sol reste très peu couvert lors des pluies orageuses qui sévissent sur la région au printemps.

En outre, les sols des surfaces contributives identifiées devraient, dans l'idéal, présenter une sensibilité à la battance non négligeable. Dans la région, la plupart des sites sensibles correspondent aux limons-argileux. Par la suite, des prélèvements à la tarière ont été effectués, afin d'identifier la texture associée aux surfaces étudiées.

Enfin, la dynamique du ruissellement dépend des dimensions et de la topographie des surfaces contributives. Les principaux chemins d'eau potentiels doivent être identifiés par des observations sur le terrain, suivant la localisation du dispositif d'hydraulique douce. Ce dernier devrait être perpendiculaire et centré sur le principal axe de ruissellement, afin de recevoir l'ensemble des flux hydro-sédimentaires.

Critères de choix des dispositifs d'hydraulique douce

Le choix fut d'identifier des dispositifs représentatifs de ceux présentés à Schwindratzheim et des principaux aménagements mis en place dans le Bas-Rhin ces dernières années. Il fut ainsi

convenu d'identifier une série de fascines et de haies (arbustives et herbacées) géographiquement proches les uns des autres, afin de pouvoir réaliser régulièrement des visites de terrain.

Fascines : Les deux fascines retenues pour l'étude correspondent à celles présentées en première partie (*cf.* 2.1.4., pp. 24-27).

Haies arbustives : Les haies présentées à Schwindratzheim étant très jeunes, l'intérêt fut d'identifier des dispositifs assez développés pour constituer une barrière végétale efficace face à une éventuelle coulée d'eau boueuse. Les choix ont été orientés vers des haies ayant une forte densité et une ramification importante à la base.

Haies herbacées : À partir des propriétés biomécaniques des plantes, le « standard 601 » (NRCS, 2010) précise les qualités requises aux plantes pour constituer des haies herbacées efficaces. Le premier critère utilisé est le *Vegetative Stiffness Index* (VSI) : $VSI = p.d^4$, avec p correspondant à la densité de tiges et d au diamètre moyen des tiges. Au cours d'une étude portant sur l'efficacité des haies herbacées, l'Aréas a établi une liste d'espèces répondant au Standard 601 (Richet et *al.*, 2014). Parmi ces dernières, le *Miscanthus Giganteus* fut caractérisé comme étant la haie herbacée la plus efficace pour limiter l'érosion, favoriser l'infiltration et le dépôt des sédiments. Cette espèce dispose en outre de tiges hautes et érigées toute l'année, ce qui garantit une bonne efficacité lors des événements pluvieux d'hiver. Dans le cas de l'Alsace, contrairement à la Haute Normandie, les précipitations hivernales sont moins marquées d'une part, et les sols moins battants d'autre part : un dispositif taillé en hiver (en laissant au moins 40 cm en place) suffit à retenir les sédiments. En outre, la taille hivernale permet de faire repartir la pousse du *Miscanthus* plus vite et de le valoriser pour le bois de chauffe.

- **Présentation des dispositifs retenus pour l'étude**

Sur les 10 sites visités (*cf. annexe 1*, p. 96), 6 modalités ont été retenues; une haie arbustive de Saules à Alteckendorf, deux fascines à Ettendorf, deux bandes de *Miscanthus* à Grassendorf et une haie ancienne à Breuschwickersheim. Si l'on ajoute le site de Schwindratzheim, 15 modalités ont été retenues (figure 27).

Communes	Modalités	Type de dispositif	Espèces	
Schwindratzheim	1	Haie arbustive	Églantier commun (8) ; Cornouiller sanguin (8) ; Prunelier (8)	
	2	Fascine + haie	Noisetier commun (12) ; Fusain d'Europe (12)	
	3	Haie arbustive basse	Groseillier sauvage (v12) ; Cornouiller sanguin (12)	
	4	Canisse morte		
	5	Haie arbustive basse	Aubépine commune (12) ; Prunelier (12)	
	6	Canisse vivante	Troènes communs (40)	
	7	Haie herbacée	<i>Miscanthus giganteus</i>	
	8	Fascine morte		
	9	Bande enherbée	Pissenlits, luzernes, avoine élevée, poa	
Alteckendorf	10	a b	Haie arbustive	Saules
Breuschwickersheim	11	a	Haie ancienne	Merisiers et Aubépines
		b		
		c		
		d		
Ettendorf	12	Fascine		
	13	Fascine		
Grassendorf	14	a	Bande de <i>Miscanthus</i>	<i>Miscanthus giganteus</i>
		b		
		c		
	15	Bande de <i>Miscanthus</i>	<i>Miscanthus giganteus</i>	

Figure 27 : présentation des différentes modalités retenues pour l'étude

Afin de faciliter les visites de terrain, ces dispositifs devaient être relativement proches les uns des autres. Hormis la haie ancienne de Breuschwickersheim, les aménagements retenus se situent ainsi à proximité du site de Schwindratzheim (figure 28).

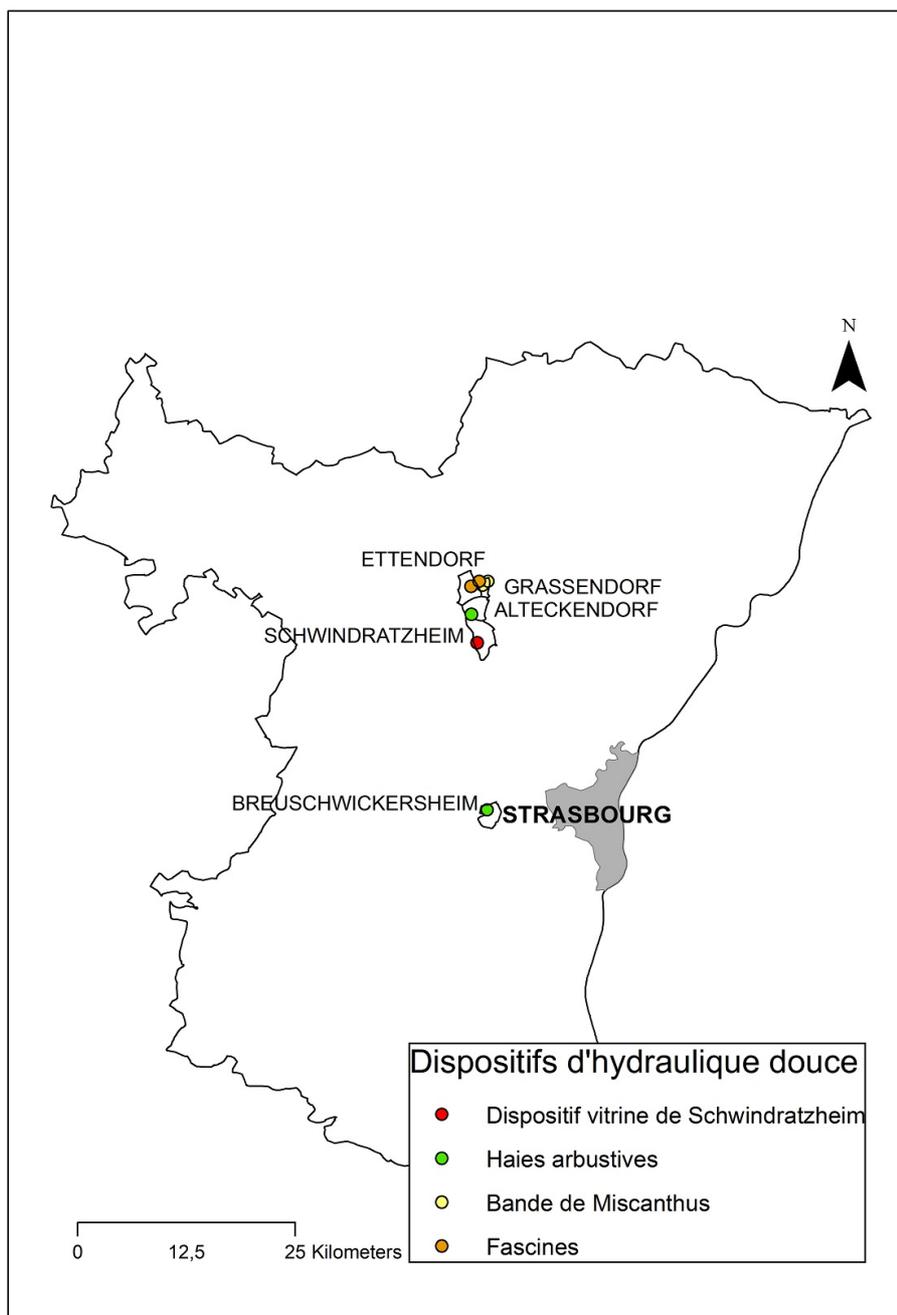


Figure 28 : Localisation des dispositifs d'hydraulique douce retenus pour l'étude. Source du fond cartographique : IGN.

- **Présentation des fascines**

Les deux fascines retenues pour l'étude font l'objet d'une présentation détaillée au cours de la seconde partie (*cf.* 2.1.4., pp. 24-27). Ces fascines ont été retenues d'après leurs localisations, l'une recevant des flux provenant d'une surface contributive relativement grande (F1), et l'autre recevant des flux provenant d'une surface contributive plus réduite (F2). Pour cette partie, F1 correspond à la modalité 12, et F2, à la modalité 13 (figure 27), ces deux fascines étant localisables sur la figure 29.



Figure 29 : Localisation des fascines (modalités 12 et 13) à Ettendorf. Source : CIGAL, 2012 ; IGN.

- **Présentation des haies arbustives**

Parmi l'ensemble des haies visitées, une haie de Saules à Alteckendorf fut retenue. Les haies de Saules sont fréquemment utilisées pour ces types d'aménagement. Ces essences sont très robustes et apprécient les milieux humides. Elles peuvent ainsi aisément se développer sur les fonds des vallons, face au principal axe de ruissellement, comme c'est le cas à Alteckendorf (figure 30).

Cette haie, installée en 2008, fut à l'origine associée à une fascine, aujourd'hui trop altérée pour être fonctionnelle. Cependant, les restes du fagot, composés d'un mélange de vieux bois et de sédiments forment une légère bordure entre la parcelle et le dispositif, qui participe au ralentissement hydraulique en surface.

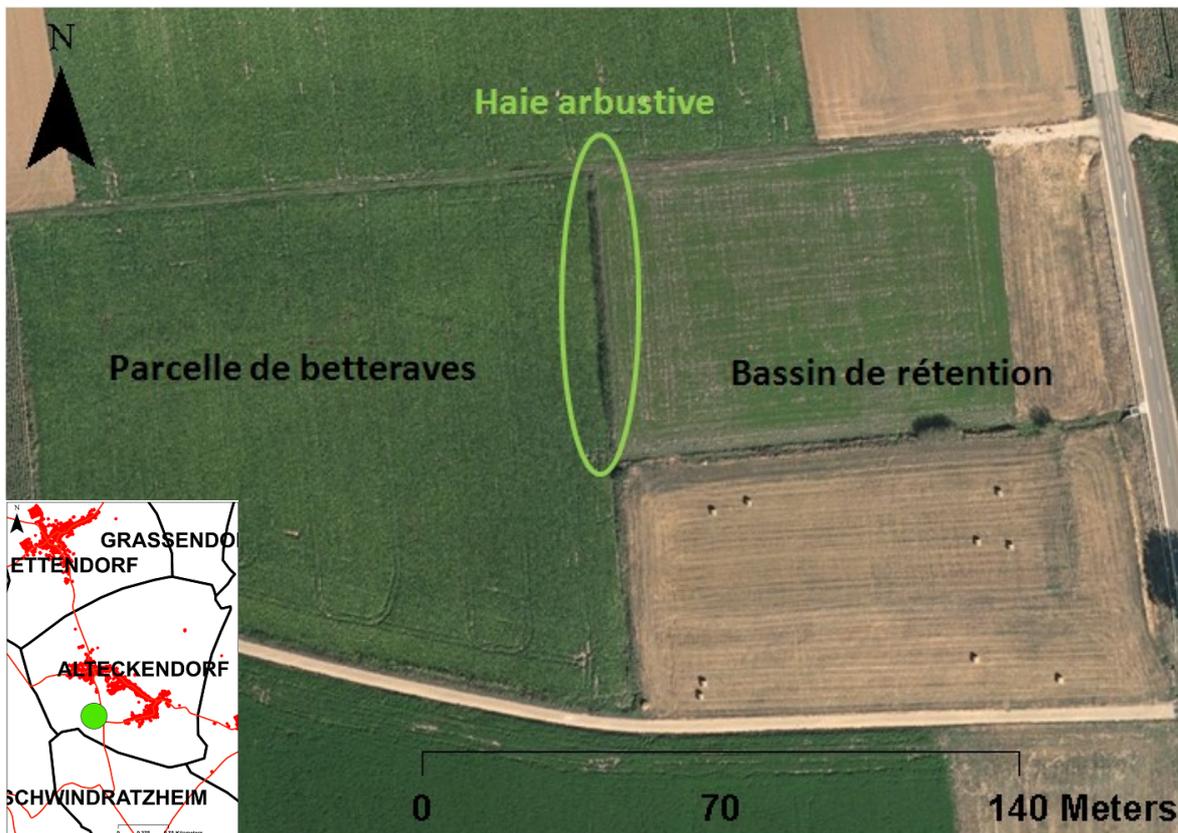


Figure 30 : Localisation de la haie arbustive retenue pour l'étude à Alteckendorf. Source : CIGAL, 2012 ; IGN.

Cette année (2016), la haie est située à l'aval d'une parcelle de betteraves labourée (photographie 9), ce qui pourrait être favorable, au vu de la faible couverture des betteraves au printemps, au déclenchement de coulées d'eau boueuses. Toutefois, la haie ne semble pas tout à fait axée sur le talweg et les flux sont susceptibles de ne pas être tous interceptés. Cette particularité peut être prise en compte, notamment en modélisant les chemins d'eau potentiels, à l'aide des données Lidar à disposition.



Photographie 9 : Haie de Saule à Alteckendorf, à l'aval d'une parcelle de betterave labourée. Auteur : B. Friconnet, le 20/04/2016.

Pour pallier cette éventualité, et pour compléter la panoplie des dispositifs, il fut convenu d'identifier et de caractériser une haie arbustive ancienne, qui ne fait pas l'objet d'une gestion récente. Bien que la plupart des haies anciennes aient été supprimées depuis le remembrement, il reste quelques-uns de ces éléments paysagers dans le Bas-Rhin, notamment à Breuschwickersheim, où une visite de terrain fut conduite pour identifier la haie ancienne (figure 31).



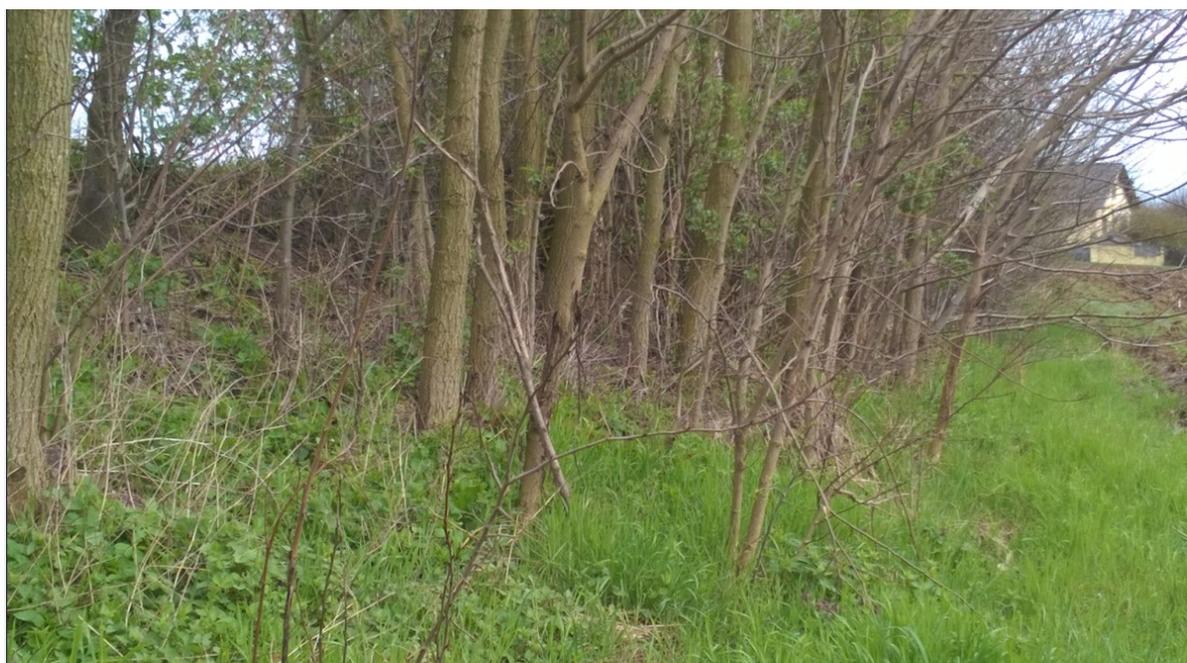
Figure 31 : Localisation de la haie ancienne retenue à Breuschwickersheim. Source : CIGAL, 2012 ; IGN.

Contrairement aux haies arbustives anti-érosives récemment aménagées, les haies anciennes sont constituées d'une multitude d'espèces d'arbres, d'arbustes et de végétaux herbacés (photographie 10). À Breuschwickersheim, la haie, longue 51 mètres et large de 2 à 6 mètres, est composée de cerisiers et d'Aubépines, dont les arbres possèdent des troncs allant jusqu'à 40 cm de diamètres.



Photographie 10 : vue d'ensemble de la haie ancienne retenue à Breuschwickersheim, depuis la parcelle de blé à l'aval. Auteur : P. Van Dijk, le 04/04/2016

Localisée entre deux parcelles labourées (maïs à l'amont, blé et maïs à l'aval), la haie est située sur un talus dont la hauteur entre l'amont et l'aval varie entre 1,5 et 2 m (photographie 11). Elle présente une forte densité de végétaux ainsi que de bois mort et résidus organiques qui recouvrent une grande partie du sol.



Photographie 11 : vue rapprochée de la haie ancienne à Breuschwickersheim. Il est possible d'observer le talus entre la surface amont (en haut à gauche) et la surface aval (en bas à droite). Auteur : P. Van Dijk, le 04/04/2016.

En outre, cette haie abrite une faune très diversifiée ; rongeurs, oiseaux, mollusques, et même des renards, ayant trouvés refuge dans un terrier que l'on peut distinguer à la surface du talus (photographie 12).



*Photographie 12 : terrier de renards au centre de la haie à Breuschwickersheim.
Auteur : B. Friconnet, le 20/04/2016.*

Présentation des bandes de Miscanthus

Depuis 2009 de nombreuses bandes de *Miscanthus giganteus* ont été installées dans le Bas-Rhin. Deux dispositifs à Grassendorf et deux autres à Bitschoffen ont été visités. Finalement, ce sont les deux bandes de *Miscanthus* à Grassendorf qui ont été retenues, ces dernières étant suffisamment denses et bien axées face au talweg, perpendiculairement au sens du ruissellement (figure 32).

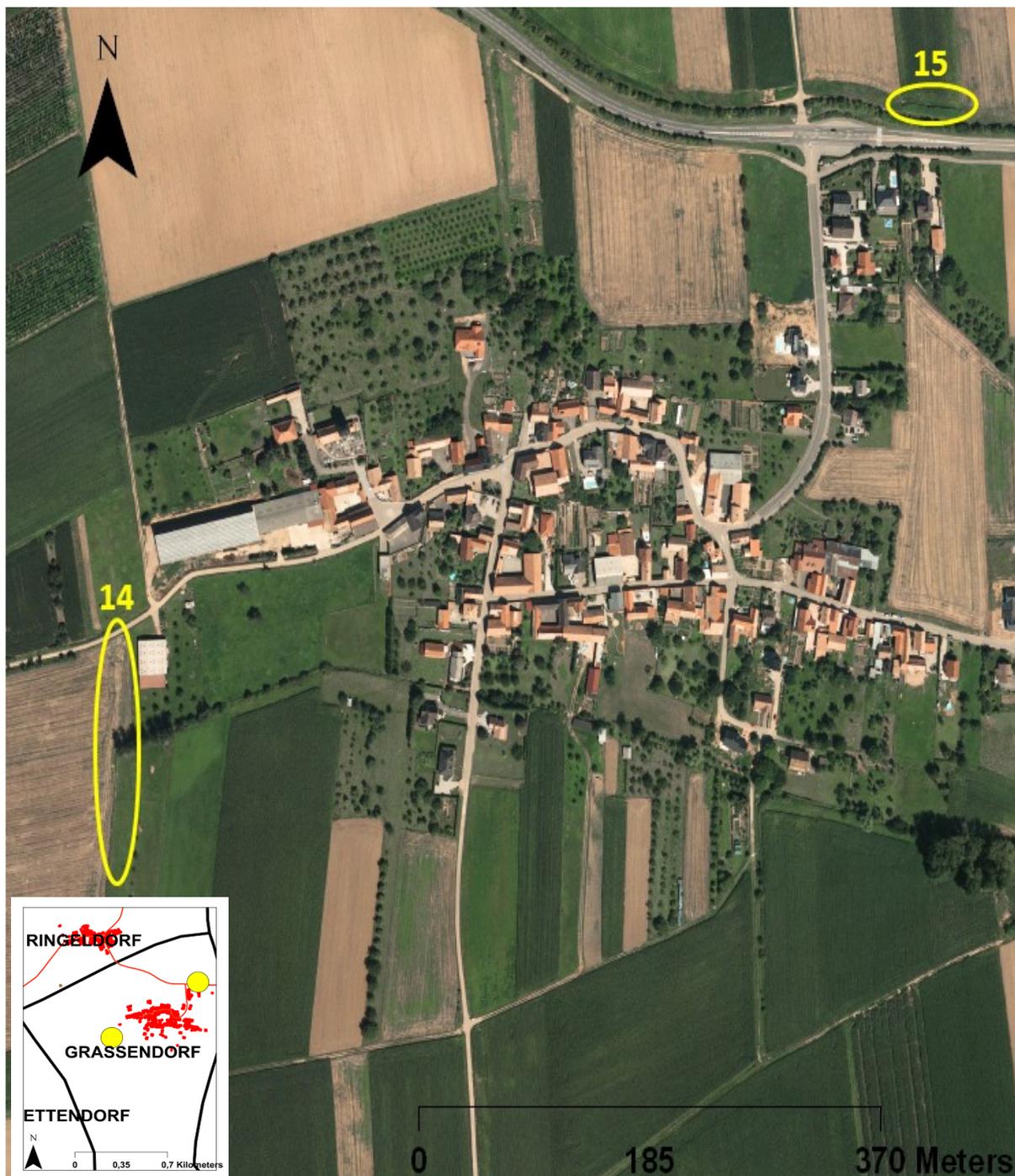


Figure 32 : localisation des 2 bandes de Miscanthus (modalités 14 et 15) retenues à Grassendorf. Source : CIGAL, 2012 ; IGN.

Le dispositif 14 (photographie 13), implanté en 2014, s'étend sur une très grande distance (plus de 100 mètres) à l'aval d'une parcelle de maïs labourée, ce qui pourrait être intéressant en cas d'événement orageux. Sa largeur varie de 3 à plus de 10 mètres au niveau du talweg.



Photographie 13 : bande de *Miscanthus giganteus* à Gressendorf le 06/04/2016

Le dispositif 15 (photographie 14), implanté en 2008, est beaucoup plus dense. Sa largeur, de 7 mètres est constante sur toute sa longueur (environ 40 m). Les tiges sont hautes de 3 à 4 mètres. Ce dispositif est localisé à l'aval d'une parcelle de blé, dont le couvert protège le sol contre l'érosion. Une coulée d'eau boueuse est donc peu probable sur ce dispositif. Toutefois, la caractérisation de ce dernier, au regard de sa différence d'âge avec le précédent, permettrait d'évaluer d'éventuelles différences en terme de matière organique ou de conductivité hydraulique à saturation.



Photographie 14 : bande de *Miscanthus giganteus* (modalité 15), implantée à Grassendorf en 2008. Auteur : B. Friconnet, le 10/03/2016.

La partie suivante présente le protocole de terrain qui fut mis en œuvre, incluant une série d'observations, de mesures et de prélèvements ayant été effectués sur ces 15 modalités.

3.2. Méthode et outils

3.2.1. Démarche de l'étude

L'efficacité d'un dispositif d'hydraulique douce à retenir les sédiments est fortement corrélée au débit spécifique (Ouvry *et al.*, 2012). En outre, les résultats présentés en seconde partie illustrent le rôle de la quantité d'eau arrivant depuis l'amont sur la capacité d'interception d'un dispositif. Toutefois, cette efficacité ne dépend pas seulement du débit mais aussi de sa capacité à ralentir le ruissellement. Pour représenter ce paramètre, le coefficient de rugosité *Manning* (n , en $s/m^{1/3}$) fut calculé pour chaque dispositif. Ainsi, l'efficacité d'un dispositif est fonction de la quantité d'eau provenant de l'amont, représentée par le débit spécifique (Q_s , en l/s/ml) et de la résistance au ruissellement, représentée par le coefficient de Manning (n) provoqué par ce dispositif, suivant la formule :

$$\text{Efficacité sur le ralentissement hydraulique} = f(Q_s, n)$$

Pour déterminer la capacité des dispositifs à ralentir le ruissellement, ces derniers ont été décomposés en trois groupes de paramètres : la structure végétalisée (tiges pour les haies et fagot pour les fascines), la rugosité de surface (végétation auxiliaire et résidus organiques) et la rugosité du sol (microrelief). Un coefficient de *Manning* fut calculé pour chacun de ces trois groupes, et pour tous les dispositifs d'hydraulique douce. Le coefficient de *Manning* final correspond à la synthèse de ces trois composantes (figure 33).

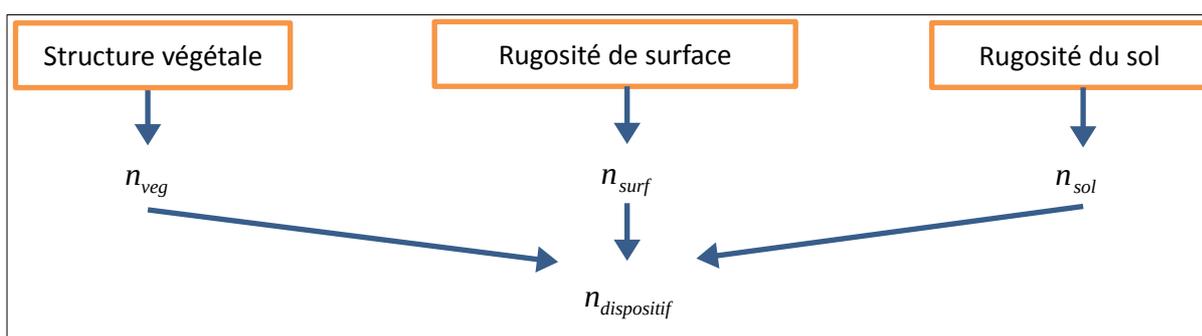


Figure 33 : synthèse des trois composantes permettant de calculer la rugosité d'un dispositif d'hydraulique douce, selon la méthode appliquée pour cette étude.

Une fois le coefficient de *Manning* calculé, il fut possible de déterminer l'efficacité de chacun des dispositifs par le calcul du STI, qui représente le taux de dépôts susceptibles d'être interceptés par les dispositifs.

3.2.2. Protocole d'observation, de mesures et de prélèvements

- **Caractérisation de la structure végétale (haies) ou du fagot (fascines)**

Pour chacun des dispositifs, un protocole fut élaboré afin de caractériser la structure végétalisée dans le cas des haies, ou du fagot dans le cas des fascines (annexe 2, pp. 97-98).

Cas des haies et bandes enherbées

Pour cette première étape, seule la végétation mise en place lors de l'installation fut caractérisée. Il s'agit de la végétation ligneuse pour les haies arbustives à Schwindratzheim, Alteckendorf et Breuschwickersheim (photographie 15), des tiges de *Miscanthus giganteus* pour les haies herbacées à Schwindratzheim et Grassendorf (photographie 16), et des tiges herbacées pour la bande enherbée à Schwindratzheim. Pour ce faire, la densité de tiges fut mesurée pour 5 classes de diamètres (de 0 à 0,5 cm; de 0,5 à 1 cm; de 1 à 2 cm; de 2 à 3 cm et plus de 3 cm), systématiquement sur une longueur de 2 mètres. Cette classification a permis de calculer le diamètre moyen pondéré pour chacune des haies, ainsi que la densité de tiges / m², en rapportant les mesures à la surface de chaque dispositifs. Ces mesures ont systématiquement été réalisées au sol et à 5 cm. À Alteckendorf, Breuschwickersheim et Grassendorf, plusieurs relevés ont été réalisés sur le même dispositif, afin de prendre en compte l'hétérogénéité au sein de ces haies.



Photographie 15 : tiges au pied de la haie arbustive à Alteckendorf. Auteur : B. Friconet, le 20/04/2016.



Photographie 16 : tiges au pied de la bande de *Miscanthus* à Grassendorf. Auteur : B. Friconet, le 12/04/2016.

Cas des fascines

Le protocole de terrain pour caractériser les fascines fut défini sur la base des critères qui ont justifiés le choix de ces dernières, à savoir leurs capacités de stockage. Le volume de sédiments que peut stocker une fascine dépend en grande partie de son état d'altération, de son niveau de

compaction mais aussi de ses dimensions. Pour les quatre modalités, dont deux à Swindratzheim (photographie 17 et 18) et deux à Ettendorf, ont été mesurés les dimensions (largeur, longueur, hauteur du fagot, distance entre le fil et le fagot) et qualitativement, l'état des fascines (niveau d'altération, de compactations, de colmatage, trous à la base du fagot).



Photographie 17 : Fascine (modalité 2), à Swindratzheim.
Auteur : B. Friconet, le 10/04/2016



Photographie 18 : Fascine (modalité 8), à Swindratzheim. Auteur : B. Friconet, le 10/04/2016

- **Caractérisation de la rugosité de surface (obstruction des végétaux et résidus au sol)**

Dans le cas des haies arbustives, la végétation auxiliaire (herbacée) représente le principal frein hydraulique au ruissellement. En effet, dans la plupart des cas, la densité des végétaux ligneux, relativement faible, ne suffit pas pour constituer une barrière végétale efficace. Quand bien même les densités sont fortes, telles que dans le cas des bandes de *Miscanthus*, des études réalisées par l'Aréas ont montré que le principal frein au ruissellement était associé à la présence de Mulch et non à la densité de tige / m² (Richet *et al.*, 2014).

Afin de caractériser les différents états de surface, les taux de couverture au sol ont été identifiés, en considérant l'ensemble de la végétation vivante auxiliaire mais aussi la végétation morte, à l'aide de l'estimation des couvertures (*cf. annexe 3*, p. 99). Ces observations ont été

réalisées en utilisant un décimètre rigide lâché aléatoirement, et à trois reprises, aux pieds de toutes les haies arbustives et herbacées (photographie 19).



Photographie 19 : Estimation des taux de couverture au sol, pour la modalité 1 à Schwindratzheim. Auteur : B. Friconnet, le 01/04/2016.

- **Caractérisation de la rugosité du sol (Microrelief)**

La rugosité du sol fut estimée à l'aide d'une chaînette métallique placée en travers de chaque modalité. Ces mesures permettent d'estimer la microtopographie à la surface du sol. Il est donc préférable, avant de poser la chaînette au sol, de déplacer les résidus organiques de la surface mesurée, avant de les remettre en place. Toutefois, il fut difficile de réaliser ces mesures sans prendre en compte une partie de la végétation spontanée, notamment pour les haies et bande enherbée de Schwindratzheim, qui recouvrent une grande partie de la surface. Le rapport entre la longueur mesurée, après avoir positionné la chaînette au sol, et la longueur de cette dernière (253 cm), permet de calculer la rugosité aléatoire (Masson., 2011), d'après la formule suivante :

$$\text{Rugosité aléatoire} = (1 - (\text{longueur mesurée} / \text{longueur chaînette})) * 100$$

Ces taux ont été estimés en avril et en juin. En outre, la taille des résidus fut prise en compte sous forme de 2 classes (moyens et gros).

Les mesures et calculs des caractéristiques du couvert végétal et de la rugosité de surface, présentés ci-dessus, doivent permettre d'estimer le frein hydraulique provoqué par les obstacles présent sur le chemin du ruissellement. Toutefois, le calcul de l'efficacité d'un dispositif à ralentir le ruissellement doit également prendre en compte sa capacité à absorber une partie de l'eau de surface au cours d'un événement pluvieux.

- **Caractérisation des propriétés du sol**

Détermination de la texture et du taux de matières organiques

Afin de caractériser les propriétés des sols, des carottages à la tarière ont été effectués au sein des parcelles, à l'amont des dispositifs d'hydraulique douce. Les prélèvements ont été réalisés au sein de l'horizon superficiel (15 premiers centimètres). Des analyses en laboratoire (analyses SADEF) ont permis de déterminer la texture et le taux de matières organiques des surfaces à l'amont des dispositifs. À partir du triangle du GEPPA (*cf. annexe 4, p. 100*) il fut possible d'identifier le type de sol associé à ces textures.

Densité apparente pour estimer la porosité

La densité apparente est un indicateur du niveau de porosité des sols, et donc de sa capacité d'infiltration, en cas d'événement pluvieux. Systématiquement, trois échantillons ont été prélevés, à la fois sur les parcelles amonts et au sein des modalités. La prise d'échantillons fut réalisée à l'aide d'un cylindre métallique d'une largeur de 5 cm et dont le volume équivaut à la quantité de terre prélevée, soit 100cm^3 . L'échantillon, enrobé de papier aluminium, fut ensuite pesé pour obtenir la masse fraîche (MF), puis séché à l'étuve pendant 48h à 100°C pour obtenir la masse sèche (MS). La tare (T) correspond au poids de l'aluminium. Il fut possible de calculer la densité apparente, à partir de la formule suivante :

Calcul de DA :

$$DA = \frac{MS - T}{V_c} \quad \text{Avec DA : densité apparente (g/cm}^3\text{), MS : masse sèche de l'échantillon (g), T : la tare (g), } V_c \text{ : volume du cylindre (cm}^3\text{)}$$

Mesures d'infiltrométrie à partir de la méthode de Beerkan

La capacité d'infiltration dépend principalement de deux variables : la sorptivité, qui pour un sol donné dépend de l'humidité initiale, et la conductivité hydraulique à saturation (K_s , en mm/h) qui représente la composante gravitaire en situation de saturation (Philip, 1957). Pour cette

étude, on se limite volontairement à la caractérisation de K_s , qui ne dépend pas des conditions d'humidité initiales.

Afin de calculer K_s , des mesures d'infiltration ont été réalisées à partir d'une variante de la méthode de Beerkan (Braud *et al.*, 2005), pour laquelle on s'intéresse uniquement à l'infiltration en condition de saturation. Des sorties de terrain ont consisté à mesurer la durée d'infiltration d'un volume de 85 ml d'eau dans le sol. Il s'agit du volume (V) nécessaire pour remplir un cylindre, de 5,2 cm de rayon (r), à hauteur (h) d'1 cm, calculé suivant la formule :

$$V = \text{Pi} \cdot r^2 \cdot h$$

Des dosettes de 85 ml ont été versées dans le cylindre, enfoncé à 2 cm de profondeur dans le sol (photographie 20). Les cylindres ont été alimentés en eau pendant environ une heure avant de démarrer les mesures. La durée d'infiltration fut chronométrée et l'opération fut répétée jusqu'à ce que la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol se stabilise.



Photographie 20 : Mesures d'infiltrométrie à Schwindratzheim.

Auteur : B.Fricconet, le 01/04/2016

Il s'agit d'une mesure d'infiltration « à charge semi-constante ». C'est-à-dire que la charge d'eau est versé très régulièrement (tous les cm, après infiltration), mais n'est pas tout à fait constante. Deux à trois répétitions ont été réalisées par modalités. Des mesures au sein des parcelles, à l'amont des dispositifs ont également été réalisées afin de les comparer à des valeurs de « références », et d'estimer les différences potentielles.

Suite à ces mesures, la méthodologie de travail qui fut mise en œuvre dans le cas des dispositifs d'hydraulique douce du Bas-Rhin se réfère au calcul du coefficient de *Manning*, qui traduit le frein hydraulique engendré par un obstacle.

Il fut dans un premier temps envisagé d'utiliser le modèle *VFSMod* dans le but de modéliser l'efficacité d'interception en sédiments pour tous les dispositifs d'hydraulique douce. Toutefois, ce modèle fut mis en œuvre afin de modéliser l'efficacité des bandes enherbées. En outre, une étude de sensibilité fut menée lors de la mise en œuvre du modèle (Munoz-Carpena, 2014) dans le but de connaître les paramètres les plus influents sur les résultats et pour faciliter sa calibration. L'étude montre que la valeur du coefficient de *Manning* de l'herbe n'affecte que très peu la rétention en sédiments par la bande enherbée. Des études antérieures (Munoz –Carpena *et al.*, 1993a) ont montrées que le coefficient de *Manning* contrôle surtout le temps d'arrivée du pic de ruissellement.

Ce modèle n'étant pas adapté dans le cadre de cette partie, la méthode proposée à la suite de ce rapport correspond au calcul du taux d'interception des sédiments pour tous les dispositifs.

3.2.3. Méthode de calcul de l'efficacité des dispositifs d'hydraulique douce

Cette partie consiste à traduire les observations et analyses en valeurs quantitatives et qualitatives représentatives du frein hydraulique. Ce frein hydraulique peut être estimé par le coefficient de *Manning*, dont la valeur dépend de la combinaison des paramètres associés aux propriétés de la couverture végétale, à l'état de surface et aux propriétés des sols des dispositifs d'hydraulique douce.

- **Calcul du coefficient de *Manning* associé à la végétation (n_{veg})**

Le coefficient de *Manning* de la végétation traduit le frein hydraulique généré par la rugosité de la végétation des dispositifs d'hydraulique douce. Il s'agit des espèces ligneuses dans le cas des haies arbustives, des tiges de *Miscanthus* dans le cas des bandes de *Miscanthus* et des tiges herbacées dans le cas des bandes enherbées. Pour réaliser ces calculs, les densités, ainsi que les diamètres moyens pondérés de chacun des dispositifs ont été utilisés, afin d'estimer le volume total occupé par les tiges.

La première étape a permis de calculer le rayon hydraulique associé à la structure végétale. Ce calcul utilise le diamètre moyen pondéré de la végétation (d , en mètres) ainsi que la densité de végétation (λ , qui s'exprime en nombre de tiges / m²), suivant la formule :

$$r_v = \pi d \frac{1 - \lambda}{4 \lambda}$$

Ce rayon moyen fut multiplié par le coefficient (r_v'), qui prend en compte la pente (S , en fraction de %), la viscosité de l'eau (ν en m²/s), ainsi que l'accélération de la gravité (g , en s/m²). La viscosité de l'eau dépend de sa température. Pour cette étude, nous nous sommes basé sur une température de 20°C, ce qui correspond à une viscosité de 1 m²/s, suivant la formule :

$$r_v' = r_v \left[\frac{gS}{\nu^2} \right]^{1/3}$$

L'étape suivante fut de calculer le coefficient de traînée de la végétation, le CD_v (*Drag Coefficient vegetated channel*), qui correspond à la force de résistance de la végétation, qui s'oppose au ruissellement. Cette équation prend en compte le facteur de flexibilité (F_f) des tiges. Dans le cas des modalités en jeu pour cette étude, toutes les tiges sont rigides, et restent érigées, dans le cas d'un événement ruisselant, excepté la bande enherbée, dont les tiges peuvent aisément se coucher en cas de ruissellement, surtout lorsque ce dernier est concentré. Ce coefficient fut calculé par la formule suivante :

$$C_{dv} = \left(\frac{130}{r_v^{0,85}} + 0,8 \left(1 - \exp\left(\frac{-r_v}{400} \right) \right) \right) \cdot F_f$$

Finalement, le coefficient de *Manning* associé à la structure végétale fut calculé en prenant en compte l'ensemble des paramètres précédents, mais aussi la largeur (B en mètres) et la hauteur (h, en mètres) de la surface traversée par le ruissellement, suivant la formule :

$$n_{veg} = \sqrt{\frac{C_{dv}}{2g \cdot r_v (1-\lambda)^2}} \cdot \left(\frac{B \cdot h}{B+2h} \right)^{2/3}$$

- **Calcul du coefficient de *Manning* associé à la rugosité de surface (obstruction des végétaux et résidus au sol)**

Le coefficient de *Manning* permettant de calculer la rugosité de surface fut calculé en prenant en compte les taux de couverture au sol (végétation auxiliaire et résidus organiques au sol) ces derniers faisant office de frein au ruissellement (*percent cover*). Le nombre de Reynolds fut également utilisé (*Reynolds number*), d'après la formule proposée par Gilley *et al.*, 1991 :

$$n_{surf} = \frac{a(\text{percent cover})^b}{(\text{Reynolds number})^c}$$

Dans cette formule, a, b et c sont des coefficients de régression qui dépendent du type de résidus. L'efficacité des dispositifs étant dépendante des débits, ces calculs ont été réalisés pour des débits spécifiques de 2 et 10 l/s/ml, pour représenter respectivement des flux diffus et concentrés.

- **Calcul du coefficient de *Manning* associé à la rugosité du sol (Microtopographie)**

Ce coefficient fut calculé sur la base de la microtopographie, mesurée à la chaînette. Il prend en compte la rugosité aléatoire (*RRo*) mais aussi le nombre de Reynolds (*Rn*), suivant la formule :

$$n_{sol} = \frac{0,172 RR_o^{0,742}}{Rn^{0,282}}$$

- **Coefficients de *Manning* finaux**

La somme des coefficients de *Manning* associés à la végétation (n_{veg}) à la surface (n_{surf}), ainsi qu'au sol (n_{sol}) correspond au coefficient de rugosité final (n). Ce coefficient fut calculé pour les différentes variables, en avril et en juin et pour des débits de 2 l/s/ml, correspondant à des flux diffus, et 10 l/s/ml, correspondant à des flux concentrés. Une moyenne des mois de d'avril et de juin fut ensuite calculée.

Une discrétisation fut proposée pour toutes les valeurs de *Manning* obtenues ; pour celles inférieures à 0,15, l'efficacité fut classée en « faible » ; pour les valeurs comprises entre 0,15 et 0,25, elle fut classée en « moyenne » ; pour les valeurs comprises entre 0,25 et 0,35, l'efficacité fut classée en « forte » ; enfin, pour les valeurs supérieures à 0,35, l'efficacité fut classée en « très forte ».

- **Incidence de la rugosité sur la quantité de dépôts : calcul du STI**

La capacité de transport est fonction de deux paramètres : la charge transportée et la vitesse du ruissellement. Dans le cas des sites étudiés, la charge transportée correspond principalement à des limons argileux. La capacité de transport est donc surtout dépendante, dans le cas des sites d'études, à la vitesse de ruissellement, cette dernière étant largement conditionnée par le coefficient de rugosité (n). Afin de déterminer la quantité de sédiments susceptible d'être interceptés, il est donc possible de calculer la rupture de charge qui se produit lorsque le ruissellement provenant d'une parcelle donnée, rencontre un dispositif d'hydraulique douce. Cette rupture de charge peut être calculée par le STI (exprimé en %), qui représente le rapport entre un coefficient de rugosité de référence (n_{ref}), associé à la parcelle, et le coefficient de rugosité d'un dispositif d'hydraulique douce (n_{disp}), suivant la formule :

$$STI = 1 - \left(\frac{n_{ref}}{n_{disp}} \right)^{0,5}$$

Pour ces calculs, la rugosité de référence fut associée à une parcelle de maïs labourée, à la fin du mois de mai, lorsque le risque d'érosion est le plus élevé. Le cas le plus intéressant fut de calculer le coefficient de *Manning* pour une parcelle de maïs labourée, à une période correspondant à la fin du mois de mai, lorsque les risques sont les plus élevés. Ce coefficient peut être calculé, comme pour ceux des dispositifs d'hydraulique douce, par la somme du coefficient associé à la rugosité de la végétation, la rugosité de surface, et la rugosité du sol.

La rugosité associée à la végétation fut calculée pour des conditions représentatives d'une parcelle de maïs en labour, à la fin du mois de mai, soit un diamètre de tige du maïs égal à 1 cm et une densité de 8 tiges / m².

Dans le cas d'une parcelle labourée, aucun résidu en surface n'est susceptible de participer au frein hydraulique; la rugosité associée aux résidus en surface est donc négligeable sur la parcelle.

Enfin, la rugosité du sol fut calculée sur la base de la texture, du taux de matières organique et du cumul des précipitations. Pour ce calcul, une texture représentative des sites d'étude, de type limons argileux, avec 25 % d'argiles, 67 % de limons et 8 % de sables, fut utilisée. Pour simuler le cas d'une situation à risque, un faible taux de matières organique fut représenté, soit 2 %. En outre, le cumul des précipitations relevées sur chacun des sites depuis le mois de mars (*cf. annexe 5, p.101*) jusqu'à fin mai, fut utilisé. La valeur modale du cumul des précipitations fut retenue, soit 137 mm.

3.3. Résultats

3.3.1. Résultats des données collectées sur le terrain

Dimensions des dispositifs végétalisés (haies et bandes enherbées)

Communes	Modalités	Type de dispositif	Largeur (m)	Longueur (m)	Hauteur des tiges (cm)	Surface (m ²)	
Schwindratzheim	1	Haie arbustive	0,42	3,85	25	2	
	2	Fascine + haie	0,75	4,17	32	3	
	3	Haie arbustive basse	0,65	4,10	25	3	
	4	Canisse morte	0,02	4,00	100	0	
	5	Haie arbustive basse	0,46	3,70	27	2	
	6	Canisse vivante	0,25	3,90	96	1	
	7	Haie herbacée	2,00	2,50	34	5	
	8	Fascine morte	0,28	3,80		1	
	9	Bande enherbée	2,00	4,00	15	8	
Alteckendorf	10	a b	Haie arbustive	0,37	58,00	350	21
				0,40	58,00	350	23
Breuschwickersheim	11	a b c d	Haie ancienne	2,00	51,00	+ de 4 mètres	102
				2,50	51,00	+ de 4 mètres	128
				3,00	51,00	+ de 4 mètres	153
				4,00	51,00	+ de 4 mètres	204
Ettendorf	12		Fascine	0,39	143,00		56
	13		Fascine	0,29	60,00		17
Grassendorf	14	a	Bande de Miscanthus	4,20	140,00	170	588
		b		12,40	140,00	190	1736
		c		2,60	140,00	120	364
	15		Bande de Miscanthus	7,00	40,00	300	280

Figure 34 : dimensions des dispositifs végétalisés mesurées sur le terrain

Densités et diamètres moyens pondérés des dispositifs végétalisés

Communes	Modalités	Relevés à 5 cm du sol		Relevés à la surface du sol		
		Nb tiges / m ²	Diamètre moyen pondéré (m)	Nb tiges / m ²	Diamètre moyen pondéré (m)	
Schwindratzheim	1	65	0,0115	29	0,03	
	2	28	0,0148	18	0,02	
	3	45	0,0107	32	0,02	
	4	3188	0,0025	3188	0,00	
	5	21	0,0166	21	0,02	
	6	142	0,0097	94	0,01	
	7	31	0,0086	31	0,01	
	8					
	9		3087	0,0025	3087	0,00
Alteckendorf	10	a	14	0,0369	9	0,04
		b	21	0,0192	19	0,03
Breuschwickersheim	11	a	4	0,0400	4	0,04
		b	8	0,0151	8	0,02
		c	1	0,0400	1	0,04
		d	6	0,0143	6	0,01
Ettendorf	12					
	13					
Grassendorf	14	a	47	0,0091	47	0,01
		b	63	0,0100	63	0,01
		c	30	0,0106	30	0,01
	15		94	0,0126	94	0,01

Figure 35 : relevé des densités et diamètres moyens pondérés des dispositifs végétalisés

Les relevés réalisés sur le terrain révèlent des densités plus fortes à 5 cm du sol, ce qui est dû aux ramifications des tiges (figure 35). En revanche, les diamètres moyens pondérés sont plus importants au sol. La bande enherbée, ainsi que la canisse morte se distinguent par des densités très élevées. En outre, les bandes de *Miscanthus* disposent de densités relativement élevées. Les plus faibles densités sont associées aux haies arbustives, les seules tiges prises en compte étant celles de la végétation ligneuse.

Au vu des importants écarts entre ces dispositifs, la densité ne peut être utilisée en tant que principal facteur responsable du frein au ruissellement. En outre, pour les haies arbustives, comme pour les bandes de *Miscanthus*, le frein au ruissellement doit surtout prendre en compte la végétation auxiliaire, qui occupe la plus grande partie de la surface au sol.

- **Dimensions et états des fascines**

Communes	Modalités	Largeur (m)	Longueur (m)	Surface (m ²)	Hauteur fagot (m)	Distance fil - fagot (cm)	Trous	Compaction	altération	Sédimentation
Schwindratzheim	2	0,35	4,17	1,46	0,66	0,50	faibles	très faible	très faible	très faible
	8	0,28	3,80	1,06	0,66	4,00	aucuns	très faible	très faible	très faible
Ettendorf	12	0,39	143,00	55,77	0,33	20,00	faibles	élevé	élevé	faibles
	13	0,29	60,00	17,40	0,30	25,00	moyens	élevé	élevé	faibles

Figure 36 : dimensions et états des fascines relevés sur le terrain.

Les fascines de Schwindratzheim se distinguent de celles retenues à Ettendorf par leurs bon états mais aussi par leurs dimensions (figure 36). Installées récemment, et régulièrement entretenues, elles ne sont que très faiblement altérées et très peu compactées. En revanche, s'agissant de fascines de démonstration, installées sur un site vitrine, les longueurs de ces dernières sont très faibles.

- **Rugosité de surface**

Communes	Modalités	Obstructions associées aux résidus présents à la surface du sol						épaisseur des résidus	
		AVRIL			JUN				
		veg vivante (%)	veg morte (%)	veg tot (%)	veg vivante (%)	veg morte (%)	veg tot (%)		
Schwindratzheim	1	67	5	72	100	0	100	moyens	
	2	17	5	22	100	0	100	moyens	
	3	7	15	22	100	0	100	moyens	
	4								
	5	47	30	77	100	0	100	moyens	
	6	40	30	70	100	0	100	moyens	
	7	45	50	95	100	0	100	gros	
	8								
	9	35	0	35	100	0	100	moyens	
Alteckendorf	10	a	10	90	100	10	70	80	moyens
		b	20	70	90	10	70	80	moyens
Breuschwickersheim	11	a	95	5	100	95	5	100	moyens
		b	70	30	100	90	10	100	moyens
		c	80	20	100	95	5	100	moyens
		d	90	10	100	95	5	100	moyens
Ettendorf	12								
	13								
Grassendorf	14	a	30	70	100	80	20	100	gros
		b	10	85	95	95	5	100	gros
		c	70	20	90	90	10	100	gros
	15	0	100	100	0	100	100	gros	

Figure 37 : rugosité de surface associé à la végétation au sol sur l'ensemble des sites d'étude.

Pour la quasi-totalité des modalités, la végétation totale au sol est plus importante en juin, ce qui est dû à l'importance de la végétation vivante au début de l'été (figure 37).

- **Rugosité au sol**

Communes	Modalités	Type de dispositif	Pente (fraction de %)	Rugosité du sol			
				Longueur chaînette (cm)	Longueur mesurée (cm)	Rugosité aléatoire (mm)	
Schwindratzheim	1	Haie arbustive	0,14	253	202	20,2	
	2	Fascine + haie	0,17	253	230	9,1	
	3	Haie arbustive basse	0,15	253	225	11,1	
	4	Canisse morte	0,20				
	5	Haie arbustive basse	0,11	253	230	9,1	
	6	Canisse vivante	0,20	253	210	17,0	
	7	Haie herbacée	0,11	253	210	17,0	
	8	Fascine morte					
	9	Bande enherbée	0,20	253	230	9,1	
Alteckendorf	10	a b	Haie arbustive	0,15	253	218	13,8
				0,15	253	218	13,8
Breuschwickersheim	11	a b c d	Haie ancienne	0,38	253	218	13,8
				0,38	253	218	13,8
				0,38	253	218	13,8
				0,38	253	218	13,8
Ettendorf	12		Fascine				
	13		Fascine				
Grassendorf	14	a	Bande de Miscanthus	0,13	253	222	12,3
		b		0,13	253	220	13,0
		c		0,13	253	230	9,1
	15		Bande de Miscanthus	0,12	253	195	22,9

Figure 38 : mesures à la chaînette et résultats de calcul des rugosités aléatoires pour l'ensemble des sites d'étude.

Bien que les haies arbustives semblent se distinguer par une micro-topographie plus accentuée (ce qui peut être associé au réseau racinaire), les longueurs mesurées à la chaînette au sol sont comprises entre 2 et 2,3 mètres (figure 38) ; les écarts sont donc relativement réduits entre les dispositifs. En outre, lors des mesures, la rugosité associée à la végétation herbacée au sol fut parfois prise en compte, ce qui peut biaiser ces résultats.

- **Propriétés du sol**

Textures et du taux de matières organiques

L'ensemble des sites (figure 39) se caractérisent par des Limons argileux (La), à l'exception de la parcelle, en amont de la modalité 15 à Grassendorf (occupée par du blé), caractérisée par des Argiles limono-sableux (Als). Cette texture plus fine confère à cette parcelle une stabilité structurale plus importante.

Les taux de matières organiques (MO) sont pour la plupart compris entre 2 et 3 %, hormis pour la parcelle d'Alteckendorf, de Breuschwickersheim et de Grassendorf, où les valeurs sont supérieures à 3 %. Ces valeurs élevées peuvent être associées aux dépôts de colluvions.

Sites	Modalités	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)	MO (%)	Types de sols
Scwhwindratzheim	1 à 9 (Parcelle)	10,81	65,69	23,5	2,75	La
Alteckendorf	10 (Parcelle)	6,8	68,4	24,7	4,13	La
Breuschwickersheim	11 (Parcelle)	9,3	64,5	26,2	3,21	La
Ettendorf	12 (Parcelle)	8,1	69,4	22,6	2,06	La
	13 (Parcelle)	6,7	73,6	19,7	1,92	La
Grassendorf	14 (Parcelle)	6,4	72,6	21	2,28	La
	14 (Haie)	-	-	-	2,85	-
	15 (Parcelle)	17,2	52,2	30,6	3,23	Als
	15 (Haie)	-	-	-	2,39	-

Figure 39 : textures et taux de matières organiques prélevés sur le terrain et analysés (SADEF) pour l'ensemble des sites d'étude.

Densités apparentes

Sites	Modalités	DA (g/cm ³)
Schwindratzheim	1 (Haie arbustive)	1,26
	2 (Fascine + haie)	1,26
	3 (Haie arbustive basse)	1,3
	5 (Haie arbustive basse)	1,28
	6 (Canisse vivante)	1,24
	7 (Haie herbacée)	1,34
	9 (Bande enherbée)	1,28
Alteckendorf	Parcelle	0,98
	10 (Haie arbustive)	0,9
Breuschwickersheim	Parcelle	1
	11 (haie ancienne)	0,86
Ettendorf	Parcelle	0,88
	12 (Parcelle)	0,92
Grassendorf	13 (Parcelle)	1,04
	14 (haie herbacée)	1,16
	14 (parcelle)	1,16
	15 (haie herbacée)	1,32
	15 (parcelle)	1,34

Figure 40 : densités apparentes calculées sur l'ensemble des sites d'étude.

La figure 40 représente les valeurs médianes des trois échantillons prélevés sur chaque modalité. Les densités apparentes sont comprises entre 0,86 g/cm³, (haie ancienne de Breuschwickersheim) et 1,34 g/cm³ (bande de Miscanthus à Schwindratzheim). Les densités

apparentes calculées pour les parcelles, ainsi que pour la haie ancienne de Breuschwickersheim et celle d'Alteckendorf sont les plus faibles, autour de 0,9 g/cm³, tandis que les autres modalités ont des valeurs correspondantes à plus ou moins 1,2 g/cm³.

Conductivités hydrauliques à saturation des sites d'étude

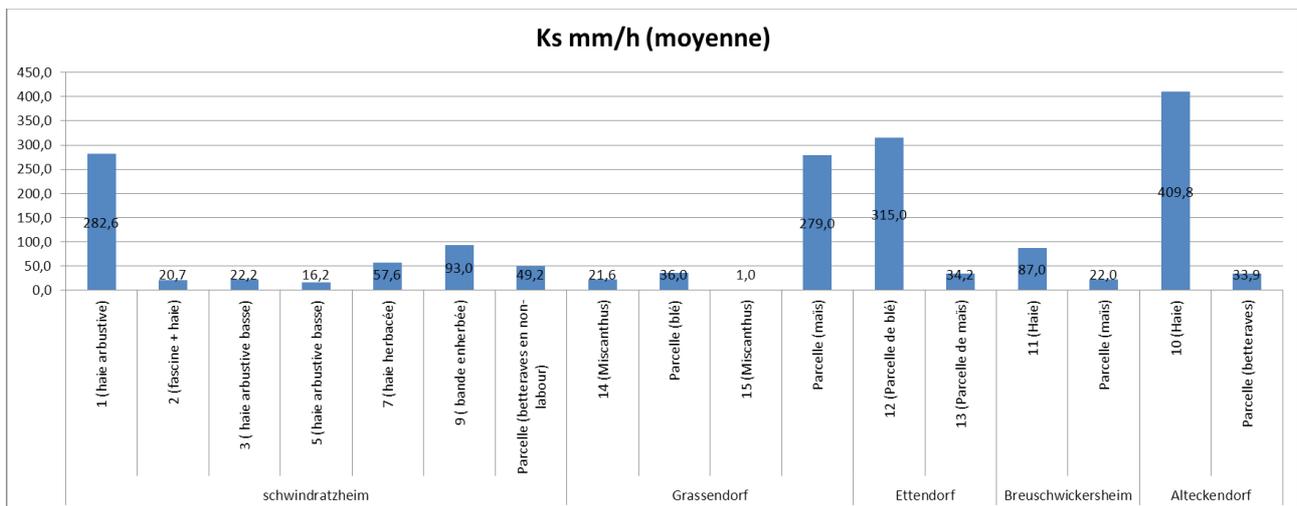


Figure 41 : conductivités hydrauliques à saturation calculées à partir des mesures d'infiltrométrie réalisées sur l'ensemble des sites d'étude.

Les conductivités hydrauliques à saturation sont très contrastées, avec des valeurs très élevées pour la plupart des parcelles, mais aussi pour la haie arbustive d'Alteckendorf et de Breuschwickersheim (figure 41). Ces résultats sont cohérents avec les valeurs des densités apparentes, les plus faibles pour ces modalités. Les valeurs les plus faibles correspondent à celles dont les densités apparentes sont les plus élevées, c'est à dire la plupart des autres modalités de Schwindratzheim et les bandes de Miscanthus de Grassendorf.

3.3.2. Résultats de l'efficacité des dispositifs d'hydraulique douce

- **Coefficients de Manning associés à la végétation**

Les coefficients de Manning associés à la végétation sont tous inférieurs à 0,01 (figure 42). Si l'on considère uniquement ces valeurs, le frein hydraulique associé à la végétation des dispositifs d'hydraulique douce est presque nul. Ces valeurs illustrent la faible importance des tiges arbustives et herbacées (dans le cas des bandes de Miscanthus) sur le ralentissement du

ruissellement, et justifie l'intérêt de prendre en compte la végétation auxiliaire et la rugosité du sol, dans le calcul du coefficient de *Manning*.

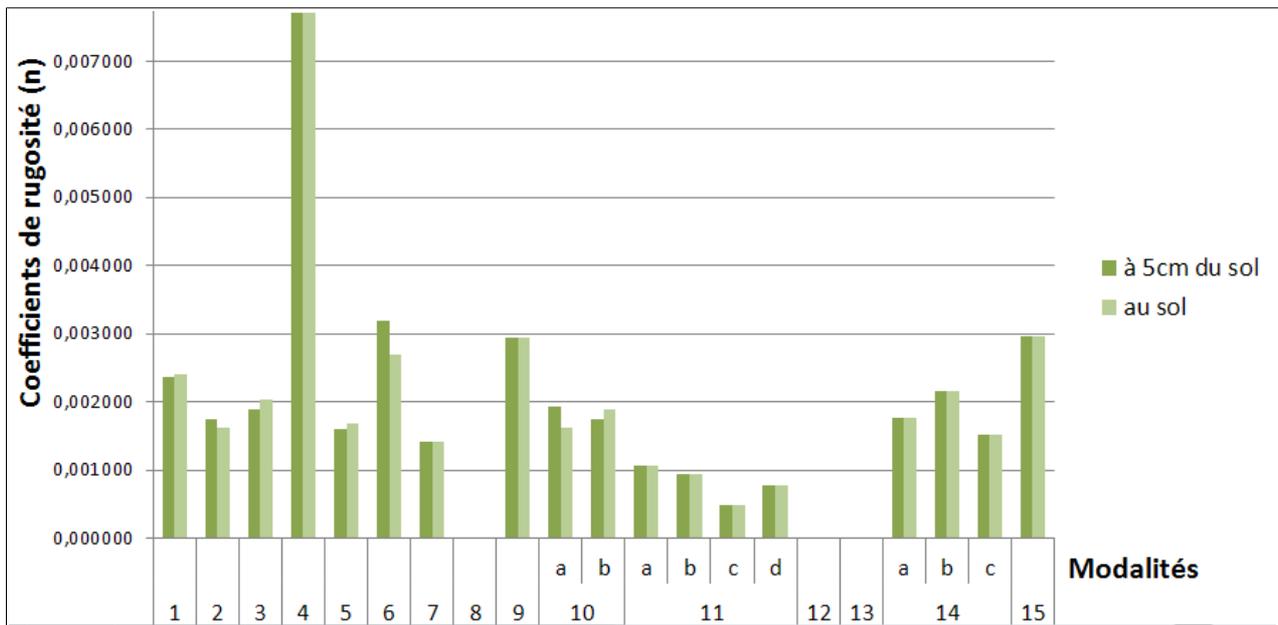


Figure 42 : coefficients de Manning associés à la végétation (n_{veg}) pour l'ensemble des sites d'étude.

- Coefficients de *Manning* associés à la rugosité de surface (végétation et résidus organiques au sol)

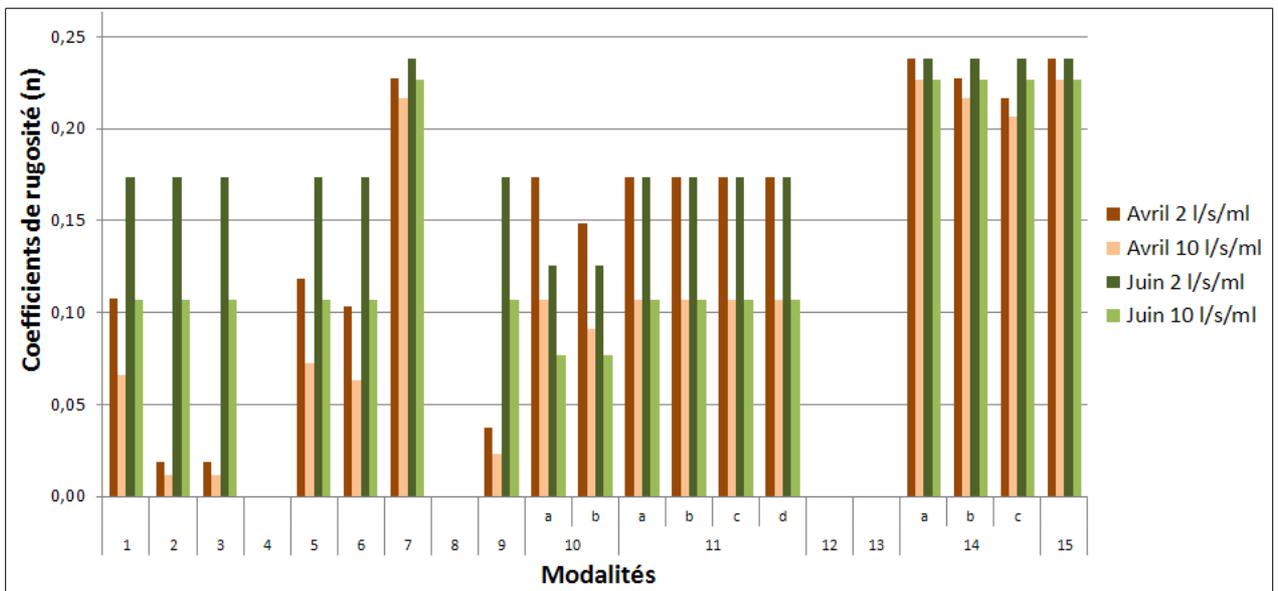


Figure 43 : coefficients de Manning associés à la rugosité de surface pour l'ensemble des sites d'étude.

D'après la figure 43, il est possible de distinguer trois groupes de dispositifs : les bandes de Miscanthus (modalité 7, 14 et 15), les haies arbustives de Schwindratzheim (modalités 1, 2, 3, 5 et 6), et les haies arbustives plus développées d'Alteckendorf et de Breuschwickersheim (modalités 10 et 11).

Les bandes de Miscanthus ont des coefficients de l'ordre de 0,23 aussi bien pour des flux diffus (2 l/s/ml) et concentrés (10 l/s/ml), en avril et en juin. Ces faibles différences s'expliquent par l'épaisse couche de résidus organiques (Mulch) présente au pieds des tiges de Miscanthus en hiver et en été. On note ici l'importance du Mulch sur le ralentissement des flux, comme l'ont déjà montré Richet *et al.*, 2014.

Les haies arbustives d'Alteckendorf se distinguent par des coefficients plus réduits, avec en juin des valeurs de 0,17 pour des flux diffus (2 l/s/ml) et 0,10 pour des flux concentrés (10 l/s/ml). En avril, les valeurs sont de l'ordre de 0,10 pour des flux diffus et 0,05 pour des flux concentrés. Au mois de juin, les coefficients sont donc plus élevés. Ceci s'explique car la végétation recouvre la quasi-totalité de la surface au sol. Les coefficients sont également sensibles aux types de flux, avec des valeurs relativement élevées pour les flux diffus et plus faibles pour les flux concentrés. Les dispositifs semblent donc être plus efficaces lorsque les flux sont réduits, ce qui est cohérent avec les études publiées par l'Aréas (Ouvry *et al.*, 2012 ; Richet *et al.*, 2014).

Enfin, les haies arbustives d'Alteckendorf et de Breuschwickersheim se distinguent surtout par des coefficients plus élevés pour des flux diffus (de l'ordre de 0,17) et plus faible pour des flux concentrés (de l'ordre de 0,11), sans différences notables entre avril et juin. En effet, peu importe la saison, ces haies disposent de résidus organiques recouvrant la quasi-totalité de leurs surfaces en hiver comme en été.

- Coefficients de *Manning* associés à la rugosité du sol (micro-topographie)

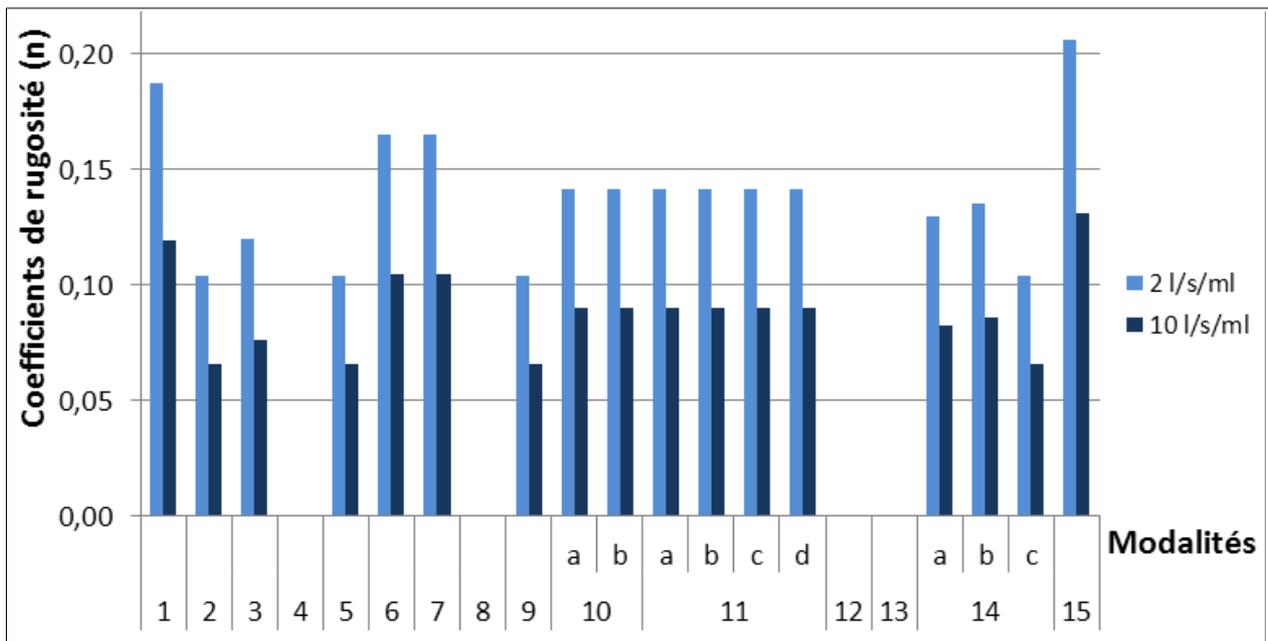


Figure 44 : coefficients de *Manning* associés à la rugosité du sol pour l'ensemble des sites d'étude.

Le facteur « rugosité du sol » met en évidence, comme pour le facteur « rugosité de surface », des coefficients de *Manning* plus élevés pour des flux diffus et relativement faibles pour des flux concentrés (figure 44).

- Coefficients de *Manning* finaux

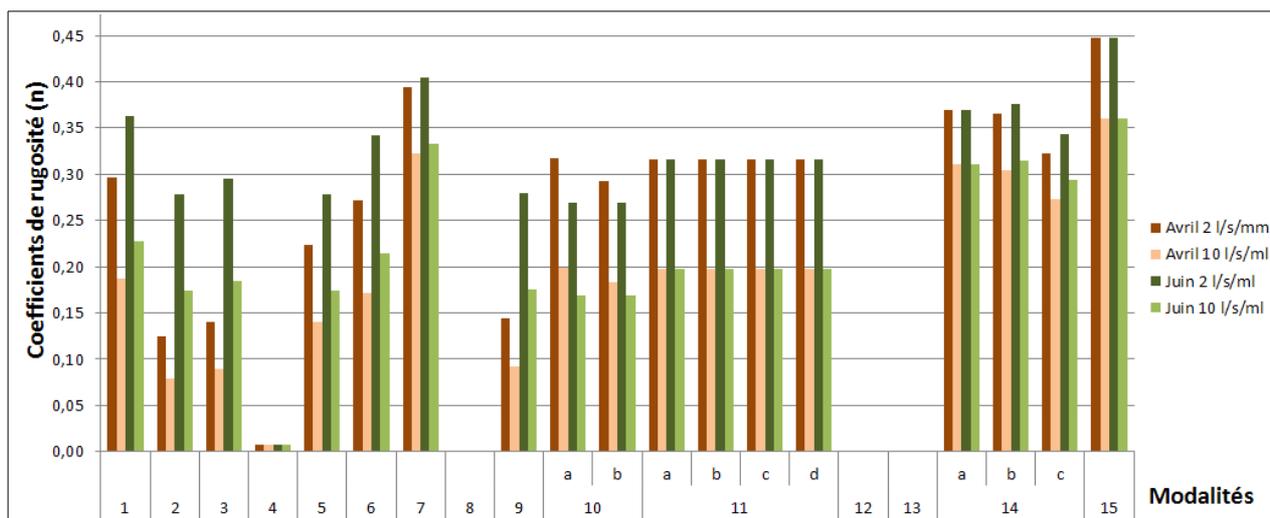


Figure 45 : coefficients de *Manning* résultant de la combinaison de la végétation, de la rugosité de surface, et du sol.

La figure 45 représente les coefficients de *Manning* finaux résultants de la somme des trois coefficients (végétation, surface et sol), en distinguant les mois de juin et d'avril, et les flux diffus et concentrés.

Le coefficient associé à la végétation étant négligeable, ces résultats représentent surtout la rugosité de surface et celle du sol. Les trois groupes de dispositifs présentés précédemment (*cf. figure 43*, pp. 84) se distinguent à nouveau sur la figure 45. En effet, la rugosité associée au sol étant peu différenciée d'un dispositif à l'autre, le coefficient de *Manning* final dépend principalement de la rugosité de surface, engendrée par la végétation auxiliaire et les résidus organiques.

Pour l'ensemble des dispositifs d'hydraulique douce, le coefficient de *Manning* dépend du type de flux, diffus ou concentré, mais aussi de l'importance de la végétation herbacée et des résidus organiques en surface. Ces derniers sont plus importants à la fin du printemps, ce qui explique les valeurs relativement élevées en juin. Les principaux écarts résultent surtout du type de flux, avec, pour des débits de 2 l/s/ml, des valeurs modales du coefficient de *Manning* de l'ordre de 0,3 et pour ceux de 10 l/s/ml, des valeurs de 0,2 (avril et juin confondus).

Comme pour le coefficient de rugosité de surface, ce sont les bandes de *Miscanthus* qui bénéficient des coefficients les plus élevés, de l'ordre de 0,4. En effet le Mulch au pied des tiges constitue une barrière efficace, pour des flux diffus ou concentrés, et pour tous les mois de l'année. Les valeurs de *Manning* pour les modalités de Schwindratzheim sont plus contrastées, avec des coefficients qui dépendent principalement du type de flux et de la période à laquelle se produit le ruissellement (avril ou juin). Les coefficients sont les plus importants en juin, et pour des flux diffus

pour tous les dispositifs. Les valeurs pour les haies d'Alteckendorf et Breuschwickersheim résultent du type de flux, ces modalités étant caractérisées par un taux de couverture au sol quasi permanent en été comme en hiver.

Bilan de l'efficacité sur le ralentissement hydraulique

Communes	Modalités	Type de dispositif	Efficacités sur la ralentissement hydraulique		
			Flux diffus	Flux concentrés	
Schwindratzheim	1	Haie arbustive	forte	moyenne	
	2	Fascine + haie	très forte	très forte	
	3	Haie arbustive basse	moyenne	faible	
	4	Canisse morte	forte	incertain	
	5	Haie arbustive basse	forte	moyenne	
	6	Canisse vivante	forte	moyenne	
	7	Haie herbacée	très forte	forte	
	8	Fascine morte	très forte	très forte	
	9	Bande enherbée	moyenne	faible	
Alteckendorf	10	Haie arbustive	a	forte	moyenne
			b	forte	moyenne
Breuschwickersheim	11	Haie ancienne	a	forte	moyenne
			b	forte	moyenne
			c	forte	moyenne
			d	forte	moyenne
Ettendorf	12	Fascine	très forte	très forte	
	13	Fascine	très forte	très forte	
Grassendorf	14	Bande de Miscanthus	a	très forte	forte
			b	très forte	forte
			c	forte	forte
	15	Bande de Miscanthus	très forte	très forte	

Figure 46 : Bilan de l'efficacité des différents dispositifs d'hydraulique douce sur le ralentissement hydraulique.

La figure 46 représente des valeurs qualitatives d'efficacité des dispositifs, pour les mois d'avril et juin confondus. Ces dernières sont cohérentes avec celles calculées et représentées sur la figure 45. Pour les fascines, les coefficients ne pouvant être calculés, des valeurs « très forte » ont été proposées. En effet, ce type de dispositif constitue une barrière efficace au ruissellement. L'état des fascines ne fut volontairement pas pris en compte pour cette discrétisation, l'objet étant de proposer des niveaux d'efficacité suivant les types de dispositifs.

Pour les flux diffus, la plupart des dispositifs sont très efficaces pour ralentir le ruissellement, les valeurs les plus fortes étant attribuée aux fascines et aux bandes de Miscanthus. Pour les flux concentrés, les valeurs sont plus contrastées, avec des valeurs « faibles » pour la bande

enherbée (modalité 9) et une haie arbustive basse à Schwindratzheim (modalité 3) jusqu'à « très forte » pour les fascines et les bandes de Miscanthus.

Coefficients de Manning d'une parcelle de maïs labourée à la fin du mois de mai (n_ref)				
n_veg	n_sol		n_total	
	flux diffus (2l/s/ml)	flux concentré (10 l/s/ml)	flux diffus (2 l/s/ml)	flux concentré (10 l/s/ml)
0,008	0,072	0,046	0,080	0,054

Figure 47 : coefficients de Manning calculés pour une parcelle de maïs labourée

Le coefficient de *Manning* calculé pour une parcelle de maïs labourée est très faible pour les deux types de flux (figure 47). En effet, aucune couverture végétale n'est présente pour ralentir suffisamment le ruissellement. Sur ce type de surface et les principaux sols des site étudiés, constitués de limons argileux, affectés par le phénomène de battance, une grande quantité d'eau précipitée ou provenant des surfaces amont est ainsi susceptible de se diriger vers les dispositifs d'hydraulique douce.

Résultats de l'incidence de la rugosité sur la quantité de dépôts

Communes	Modalités	Type de dispositif	Efficacité d'interception des sédiments (%), calculée à partir du STI	
			Flux diffus (2 l/s/ml)	Flux concentré (10 l/s/ml)
Schwindratzheim	1	Haie arbustive	51 %	49 %
	2	Fascine + haie	37 %	35 %
	3	Haie arbustive basse	39 %	37 %
	4	Canisse morte	-222 %	-165 %
	5	Haie arbustive basse	44 %	41 %
	6	Canisse vivante	49 %	47 %
	7	Haie herbacée	55 %	59 %
	8	Fascine morte		
	9	Bande enherbée	39 %	36 %
Alteckendorf	10	a	48 %	46 %
		b	47 %	45 %
Breuschwickersheim	11	a	50 %	48 %
		b	50 %	48 %
		c	50 %	48 %
		d	50 %	48 %
Ettendorf	12	Fascine		
	13	Fascine		
Grassendorf	14	a	53 %	58 %
		b	54 %	58 %
		c	51 %	56 %
	15	Bande de Miscanthus	58 %	61 %

Figure 48 : efficacité d'interception des sédiments, calculée à partir du STI, pour tous les dispositifs

3.4. Conclusion et perspective

L'efficacité des dispositifs d'hydraulique douce étudiés au cours de cette partie dépend surtout de la quantité d'eau provenant de l'amont. Les valeurs des coefficients de *Manning* sont surtout dépendantes des débits spécifiques. Pour des débits de 2 l/s/ml, les coefficients sont pour la plupart des dispositifs plus d'1/3 supérieurs à ceux calculés pour des débits de 10 l/s/ml. Ces résultats confirment la forte dépendance des débits avec l'efficacité de rétention des sédiments par les fascines, calculée au cours de la seconde partie. Il sont également cohérents avec les études menées par l'Aréas (Ouvry *et al.*, 2012 ; Richet *et al.*, 2014).

En outre, pour un débit donné, l'efficacité des dispositifs dépend principalement de la couverture végétale présente au pieds des tiges des haies herbacée et arbustives. Ainsi, pour les haies arbustives de Schwindratzheim, les taux de couvertures, bien plus importants en juin, font plus que doubler la valeur du coefficient de *Manning*. Le rôle fondamentale des résidus en surface sur le ralentissement hydraulique fut d'ailleurs démontré par Richet *et al.*, 2014, lors de l'étude sur le rôle du Mulch pour les bandes de *Miscanthus*.

Au vu des faibles coefficients de rugosité associés à la végétation, les tiges des ligneux, pour les haies arbustives, et les tiges des *Miscanthus*, pour les haies herbacées, ne semblent pas participer directement au ralentissement hydraulique. En outre, les densités sont souvent trop faibles, notamment pour les haies arbustives de Schwindratzheim et Breuschwickersheim, pour constituer une barrière végétale efficace. Toutefois, ces dernières ont un rôle indirecte mais fondamental sur le ralentissement hydraulique. Ce rôle peut être explicité à trois échelles de temps, à court, à moyen et à long terme. D'abord, à court terme, elle ont un rôle structurant, en alimentant et en maintenant les résidus organiques en surface. Le cas le plus probant est celui des bandes de *Miscanthus*. Les fortes densités de tiges permettent de générer un Mulch qui se dépose et se fixe au pied tiges. Il en est de même pour les haies arbustives ; un fagot de branches mortes s'accumule au pieds des haies, même dans le cas des jeunes haies à Schwindratzheim. À moyen terme, les tiges des arbustes ou du *Miscanthus* ont un rôle non négligeable sur la capacité d'infiltration des dispositifs, via le réseau racinaire, et en favorisant l'activité biologique du sol. Au sein des haies arbustives, surtout dans le cas de la haie de Breuschwickersheim, la porosité du sol est très importante ; de nombreux terriers et trous de toutes les dimensions ont été observés. Les mesures d'infiltrométrie réalisées ont mis en évidence des conductivités hydrauliques à saturation très élevées sur ce type de haies. Enfin, à long terme, dans le cas des haies arbustives, la végétation arbustive affectent nettement la topographie. Le dépôt des colluvions favorise la formation d'un

replat à l'amont des haies, tandis qu'un talus se forme progressivement sur la largeur de la haie. En outre, le sol du talus est stabilisé par le réseau racinaire des arbres et arbustes sur lequel ils se développent. À long terme la présence de haies favorise le développement d'un paysage composé d'une succession de talus, occupés par les haies, et de replats, occupés par des parcelles cultivées (Froehlicher Lucie *et al.*, thèse en cours).

Pour calculer la rugosité de surface, la couverture végétale fut estimée, en considérant la végétation herbacée et les résidus organiques (mulch) à la surface du sol, en se basant sur le taux de recouvrement (en %). L'épaisseur des résidus, dont le rôle devrait être important en cas de ruissellement concentré est parfois très importante (allant jusqu'à 50 cm sur certaines parties des Miscanthus. Cette épaisseur ne fut pas prise en compte, mais pourrait être intégrée au vu d'éventuelles nouvelles études. En outre, les conductivités hydrauliques à saturation ont été calculées pour la plupart des modalités mais ne furent pas intégrées au calcul des coefficients.

Pour étudier l'efficacité du génie écologique, et installer des dispositifs d'hydraulique douce, une vision à long terme s'avère très importante. En effet, la recherche d'une efficacité à court terme induit des coûts d'entretiens parfois très élevés, notamment dans le cas des fascines mortes, dont la durée de vie est très limitée (jusqu'à 7 ans au mieux). Il serait cependant possible de limiter fortement le ruissellement, en se basant sur une approche préventive, à plus long terme. La mise en place de haies entre les parcelles ne nécessite pas d'entretien particulier, exceptée une taille annuelle. Les retours bénéfiques de ces haies sont plus importants qu'une simple « barrière végétale » pour ralentir le ruissellement. Ces dernières favorisent la biodiversité, qui elle-même favorise la fertilité du sol. En outre, la formation, à long terme, d'un paysage de replats, constitué d'une succession de talus limite le risque d'érosion et favorise le dépôt des colluvions.

Bibliographie

ARMAND R., (2009), « Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol. Mise au point d'un indicateur de ruissellement », Thèse de Géographie, Université de Strasbourg, 178 p.

AUZET A.V., HEITZ C., ARMAND R., GUYONNET J., MOQUET J.S., (2005a), 'Les « coulées de boue » dans le Bas-Rhin: analyse à partir des dossiers de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle', Rapport DIREN/Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, Strasbourg. 30 p.

AUZET A.-V., MALET J.-P., MAQUAIRE O., (2005b), 'Aléas naturels à l'origine des « coulée de boue »', *Note de l'IMFS*, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

AUZET A.-V., GUERRINI M.-C., MUXART T., (1992), « L'agriculture et l'érosion des sols : importance en France de l'érosion liée aux pratiques agricoles », In: *Économie rurale*. N°208-209, L'agriculture et la gestion des ressources renouvelables, Session des 29 et 30 Mai 1991, organisée par Maryvonne Bodiguel (CNRS) avec la collaboration de Michel Griffon (CIRAD) et Pierre Muller (CRA-FNSP) sous la direction de Maryvonne Bodiguel, Michel Griffon et Pierre Muller. pp. 105-110.

BAIZE D., (1995), « Guide pour la description des sols », *INRA Editions*.

BRAUD I., DE CONDAPPA D., SORIA J., HAVERKAMP R., ANGULO-JARAMILLO R., GALLE S., VAUCLIN M., (2005), « Use of scale forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (Beerkan method) », *European Journal of Soil Science*, n° 56, pp 361-374.

CARLUER N., FONTAINE A., LAUVERNET C., MUNOZ-CARPENA R., (2011) "Guide de dimensionnement des zones tampons enherbées ou boisées pour réduire la contamination des cours d'eau par les produits phytosanitaires", Cemagref, Unité de recherche Milieux Aquatiques, Écologie et Pollutions, Lyon, 98 p.

CERDAN O., POESEN J., GOVERS G., SABY N., LE BISSONNAIS Y., GOBIN A., VACCA A., QUINTON J., AUERSWALD K., KLICK A., KWAAD F., ROXO M.J., M.J., (2006a), « Sheet and rill erosion. Soil Erosion in Europe », *John Wiley & Sons*, pp. 501–513

CERDAN O., LE BISSONNAIS Y., SOUCHERE V., KING C., ANTONI V., SURDYK N., DUBUS I., ARROUAYS D., DESPRATS J.-F., (2006b), « Guide méthodologique pour un zonage

départemental de l'érosion des sols », Rapport n°3 : Synthèse et recommandations générales, *Rapport BRGM*, 85 p.

COLMAR A. WALTER C., LE BISSONNAIS Y., DAROUSSIN J., (2010), « Démarche de validation régionale par avis d'experts du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosif », *Étude et Gestion des Sols*, n°17, pp.19-32.

COUTURIER A., DAROUSSIN J., DARBOUX F., SOUCHERE V., LE BISSONNAIS Y., CERDAN O., KING D., (2013), « Improvement of surface flow network prediction for the modeling of erosion processes in agricultural landscapes » *Geomorphology*, n° 183, pp. 120-129.

DABNEY S.M., MEYER L.D., HARMON W.C., ALONSO C.V., FOSTER G.R., (1995), "Depositional patterns of sediment trapped by grass hedges", *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*, n°38, pp.1719-1729.

FROEHLICHER L. et al., (thèse en cours), "Les haies, une alternative à l'openfield dans les zones loessiques d'Alsace ?", *Faculté de Géographie et d'Aménagement, Laboratoire Image Ville Environnement*, Strasbourg.

GILLEY J., KOTTWITZ E., WIEMAN G., (1991), "Roughness Coefficients for Selected Residue Materials", *Biological Systems Engineering*, University of Nebraska.

GUMIERE S. J., LE BISSONNAIS Y., RACLO D., CHEVIRON B., (2011), "Vegetated filter effects on sedimentological connectivity of agricultural catchments in erosion modelling: a review", *Earth Surf. Process. Landforms*, n°36, pp. 3-19.

HEITZ C., SPAETER S., AUZET A. V., GLATRON S., (2009), « Local stakeholders perception of muddy flood risk and implications for management approaches: A case study in Alsace (France) ». *Land Use Policy*, 26, (2), pp. 443-451.

LE BISSONNAIS Y., THORETTE J., BARDET C., DAROUSSIN J., (2002), « L'érosion hydrique des sols en France », INRA, IFEN, 106 p.

LEFRANCQ M., JETTEN V., VAN DIJK P., PAYRAUDEAU S., (2013), « Adapting LISEM to improve modeling of pesticide transfer by runoff and erosion », *EGU General Assembly 2013*, Vienna, Austria.

MASSON S., 2001, « Evolution des paramètres physiques du sol proche de la surface au cours du printemps en fonction des techniques culturales », *Rapport de stage*, Université de Haute Alsace.

- MEYLAN P., FAVRE A.C., MUSY A., (2005), “Hydrologie fréquentielle. Une science prédictive”, *Science et Ingénierie de l'Environnement*, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, 173 p.
- MULLER N., PARTY J.P., SAUTER J., (2012), « Notice simplifiée du référentiel pédologique d'Alsace », Association pour la Relance Agronomique en Alsace, Sol Conseil, 17 p.
- MUNOZ-CARPENA R., PARSONS J.E., (2011), “VFSSMOD-W, Vegetative Filter Strips Modelling System, Model documentation & user’s manual, version 6.x”, University of Florida.
- OUVRY J.F., RICHET J.-B., BRICARD O., LHERITEAU M., BOUZID M., SAUNIER M., (2012), “Fascines & haies pour réduire les effets du ruissellement érosif. Caractérisation de l’efficacité et conditions d’utilisation”, Association Régionale pour l’Etude et l’Amélioration des Sols (AREAS).
- PAYET E., DUMAS P., PENNOBER G., (2011), « Modélisation de l’érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, volume 11 N°3.
- PHILIP, J.R., 1957, The theory of infiltration : 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.*, 84, (257-264)
- RICHET J.-B., OUVRY J.F., SAUNIER M., (2014), « Haies herbacées anti-érosives : intérêt, faisabilité, efficacité en Haute-Normandie », Association Régionale pour l’Étude et l’Amélioration des Sols (AREAS).
- ROZAN A., *et al.*, « Projet Gerihco (3) : GEstion des Risques et Histoire des coulées Boueuses, 2014 – 2017, Étude multicritère du risque érosif : Pérennisation des comportements préventifs, étude globale du génie végétal et analyse paysagère », *Université de Strasbourg*, BETA, GESTE, LAE-Antenne Colmar, ICUBE, SAGE, LIVE, ARAA, HydrISE, 36 p.
- SAXTON K.E., RAWLS W.J., (2006), “Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions”, *Soil Science Society of America Journal*, pp. 1569-1578.
- USDA-SCS (1972), *National Engineering Handbook*, Part 630 Hydrology, Washington, D.C.
- VAN DIJK P., ROSENFELDER C., SCHEURER O., DUPARQUE A., MARTIN P., SAUTER J., (publication acceptée), « Une approche agronomique territoriale pour lutter contre le ruissellement et l’érosion des sols en Alsace ».

VAN DIJK P., KOLLER R., (2015), « Ruissellement et érosion des sols en Alsace. Ampleur, évolution et leviers d'action agronomiques », *ARAA (Association pour la Relance Agronomique en Alsace)*, 13 p.

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'étude des Sols, 11 au 15 mai 2009, Strasbourg (Schwartz, D., ed.), pp. 369-370.

VAN ROMPAEY A., VIEILLEFONT V., JONES R., MONTANARELLA L., VERSTRAETEN G., BAZZOFFI P., DOSTAL T., KRASA J., DEVENTE J., POESEN J., (2003), « Validation de l'aléa érosion des sols à l'échelle européenne », *European Soil Bureau Research Report*, Luxembourg, n°13, 27p.

WISCHMEIER W.-H., SMITH D.D., (1978), « Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide to Conservation Planning ». *Agriculture Handbook*, n° 537, Department of Agriculture Science and Education Administration, Washington, District of Columbia USA. U.S.

ZHAO C.-H., GAO J.-E., ZHANG M.-J., WANG, F., ZHANG T., (2016) "Sediment deposition and overland flow hydraulics in simulated vegetative filter strips under varying vegetation covers", *Hydrol. Process.*, n°30, pp. 163-175.

ANNEXES

Sites	Avantages / limites	Haies		Fascines
		Herbacée (Miscanthus)	Arbustive	
Alteckendorf	Avantages		Saule robuste et ancien Large diamètre des tige A l'aval de maïs non couvrants	
	Inconvénients		Haie étroite et peu dense Décentrée du talweg	
Ettendorf	Avantages			Longues fascines, axées sur le talweg Situées à l'amont d'enjeux Grand choix de dispositifs
	Inconvénients			Fascines altérées et compactées Couverture de blé d'hiver
Ringeldorf	Avantages		Tiges nombreuses et denses Centrée sur le talweg	
	Inconvénients		Haie étroite Haie associée à une fascine Située à l'aval d'une fascine Située à l'aval de parcelles de blé	
Grassendorf 2	Avantages	Haie très dense et large Tiges larges et hautes Ancien (2008)		
	Inconvénients	Blé d'hiver en amont Un peu désaxé du talweg		
Grassendorf 1	Avantages	Haie dense et large Dispositif long (au moins 100 m) Axé sur l'ensemble du talweg Maïs non couvrant en amont		
	Inconvénients	Assez récent (2014)		
Bitschoffen 1	Avantages	Long (au moins 100 m) Axé sur le talweg	Ample (1,5 à 2 mètres) Axé sur le talweg	
	Inconvénients	Densité relativement faible Parcelle cultivé en blé à l'amont Dispositif assez récent A l'aval de deux haies arbustives	Relativement récentes (2008) Blé d'hiver en amont	
Bitschoffen 2	Avantages	Dispositif très dense à l'aval de maïs non couvrant		
	Inconvénients	Excentré par rapport au talweg		
Mertzwiller	Avantages		A l'amont d'enjeux	Bon état (3 ans)
	Inconvénients		Trop jeune (2 ans) Peu dense Couvert végétal en amont Bande enherbée en amont	Couvert végétal en amont Bande enherbée en amont
Mietesheim	Avantages		2 lignes de haies	
	Inconvénients		Haie trop jeune pour être étudié	
Breuschwickersheim	Avantages		Haie ancienne Axée sur le talweg A l'aval de maïs en labour Haie dense et diversifiée	
	Inconvénients		Densité très variable	

Annexe 1 : critères de choix des modalités visitées au cours de la première sortie de terrain du 10 mars 2016 dans le Bas-Rhin

Caractérisation des dispositifs hydrauliques

Commune :

Coordonnées géographiques :

Modalité :

Condition d'humidité du sol :

Observateur :

Date :

Pluviomètre installé le :

Conditions météo :

Description et dimensions du dispositif

Type de dispositif (haie arbustive, zone enherbée..)	
Espèce(s)	
Âge du dispositif (indiquer la source)	
Largeur (m ; de 10 cm en aval à 5 cm en amont)	
Longueur (m)	
Pente (ex : 1 % = 0,01 ; 54 cm de longueur)	

Bordure en amont

Nature (parcelle, zone de dépôts, talus...)	
Largeur (m)	
Description	
Taux de végétation au sol (%)	

Propriétés de la couverture végétale

Nombre de pieds / 2 mètres		
Espace entre les pieds (cm)		
Nombre de tiges / pied (comptés sur une largeur de 2 m)	A 5cm	0 - 0,5
		0,5 - 1
		1 - 2
		2 - 3
		3 - 5
		5 - 10
	Au sol	0 - 0,5
		0,5 - 1
		1 - 2
		2 - 3
		3 - 5
		5 - 10
Hauteur des tiges (cm)		
Nombre de rangées		
Espace entre les rangées (cm ; 3 à 5 mesures)		
Prise de vue (non, en travers, en large, en plan)		

Etats de surface		
Taux de couverture au sol (%)	Végétation vivante	
	Végétation morte	
Epaisseur des résidus organique (Mulch, cm)		
Micro-relief (mesures à la chaînette, en cm)	dans le sens du ruissellement	
	perpendiculaire au ruissellement	
Macroporosité	Trous	Abondance (classes)
		Origine (vers...)
		Diamètre (cm)
	Fentes	Abondance (classes)
		Longueur (cm)
		Localisation
Hauteur de la végétation herbacée (cm)		

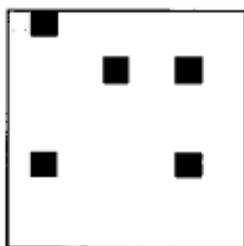
Propriétés du sol	
Prise d'échantillon (DA et humidité)	
Niveau de compaction du sol (classes)	
Piérosité du sol (%)	
Infiltrométrie	

Fascines	
Hauteur du fagot (cm)	
Distance entre le fil de fer et le fagot (cm)	
Trous à la base du fagot (peu, moyen, nombreux)	
Tassement du fagot (faible, moyen, fort)	
Sédiments au sein du fagot (peu, moyen, élevés)	

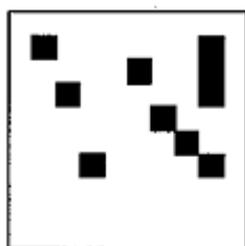
Observations

Annexe 2 : fiche de terrain élaborée et utilisée au cours des différentes sorties dans le Bas-Rhin.

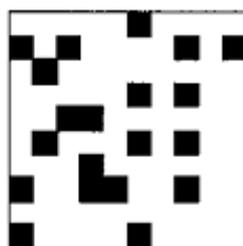
Aide à l'estimation des couvertures (%)



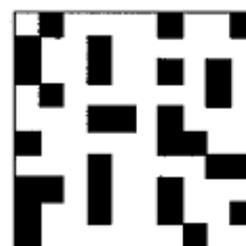
5%



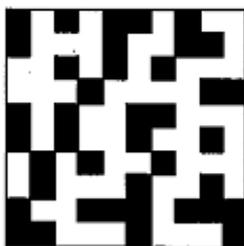
10%



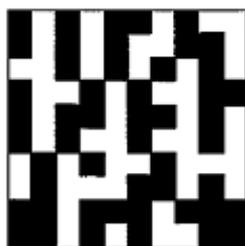
20%



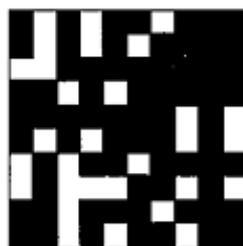
30%



40%



50%

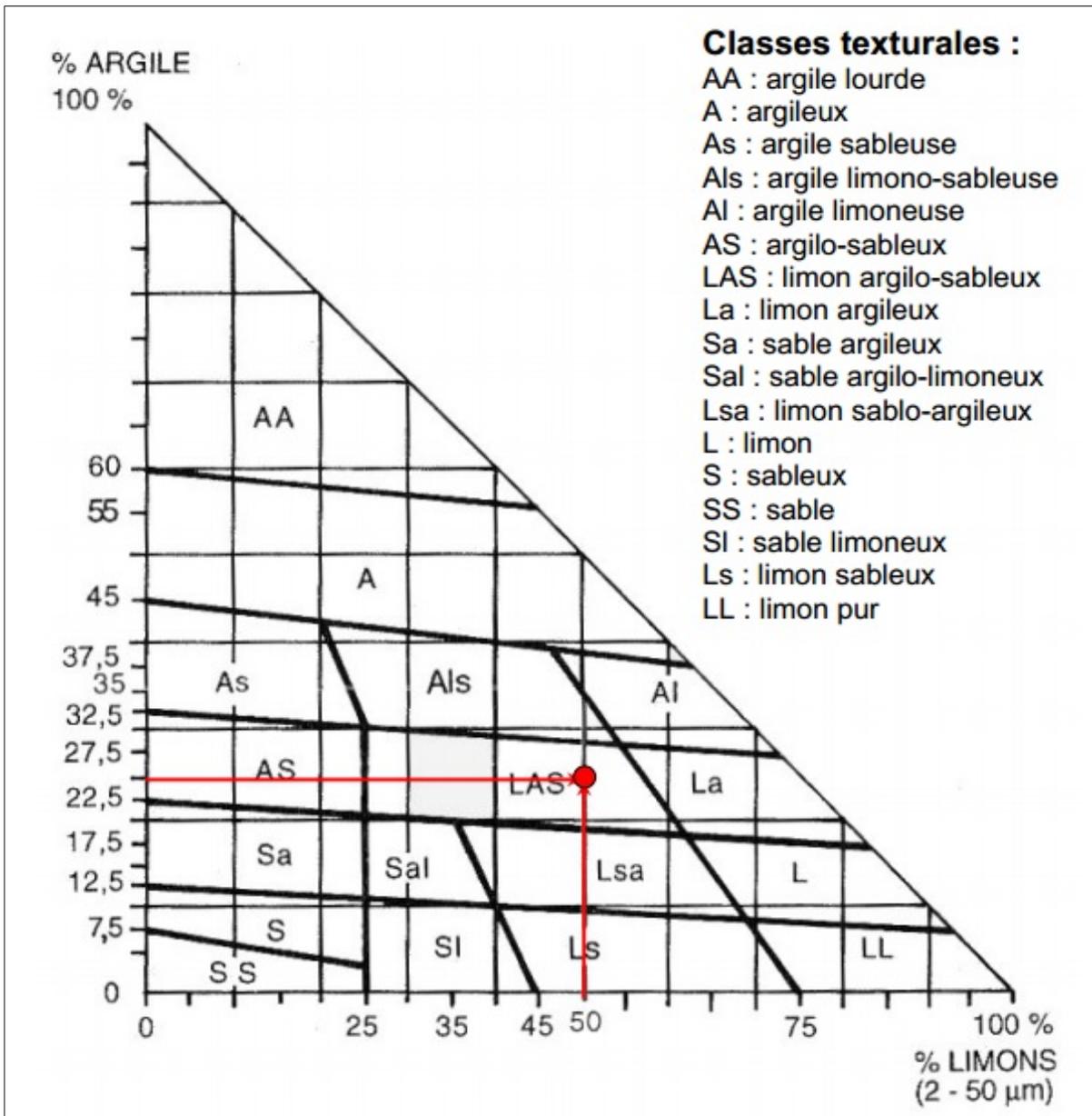


70%



85%

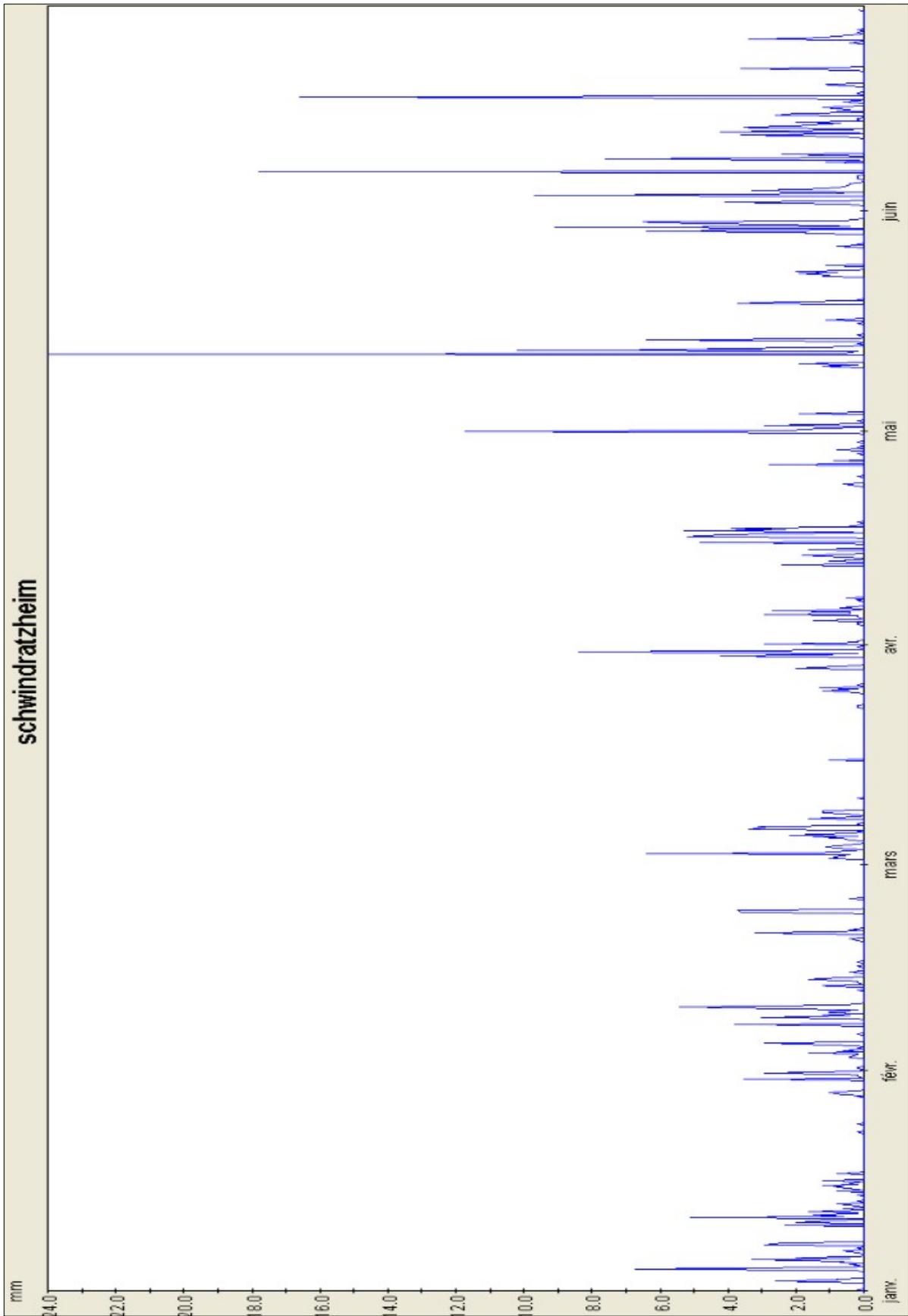
Annexe 3 : Aide à l'estimation des taux de couverture.



Annexe 4 : triangle des texture du GEPPA (Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée). Source : BAIZE D., 1995.

Communes	Relevés	Cumul des précipitations jusqu'à fin mai (mm)
Schwindratzheim	Pluviomètre électronique	379
Grassendorf	relevé le 14/04 : 6 mm	174
	relevé le 03/05/16 à 8h40 : 55 mm	
	relevé le 17/05/16 à 10h45 : 53 mm	
	relevé le 06/06/2016 à 15h30 : 60 mm	
	relevé le 29/06/2016 à 14 h : 58 mm	
	relevé le 12/07/2016 à 6h45 h : 4 mm	
Alteckendorf	Installé le 11/04/2016.	104
	Relevé le 18 avril à 12 h : 39 mm.	
	Relevé le 03/05 à 11h : 1 mm	
	Relevé le 17/05 à 10h : 9 mm	
	Relevé le 06/06/2016 à 14h16 : 55 mm	
	Relevé le 29/06/2016 à 8h30 : 46 mm	
Ettendorf	Installé le 19/04/2016 (proche fascine 2)	137
	relevé le 3/05/16 à 8h50 : 32 mm	
	relevé le 17/05/16 à 10h45 : 53 mm	
	Relevé le 06/06/2016 à 15h00 : 52 mm	
	Relevé le 29/06/2016 à 13h30 : 5 mm	
Breuschwickersheim	Installé le 20/04/2016	104
	relevé le 29 avril à 18h : 9 mm	
	relevé le 13/05 à 9h : 45 mm	
	relevé le 31/05 à 18h : 50 mm	
	relevé le 09/06/2016 à 8h45 : 25 mm	
	relevé le 28/06/2016 à 8h40 : 70 mm	

Annexe 5 : détails des relevés et du cummu des précipitations, effectués sur l'ensemble des sites d'études.



Annexe 6 : Précipitations à Schwindratzheim enregistrées depuis le 1er janvier 2016.

Tables

Table des photographies

Photographie 1 : Fascine installée en 2009, Ettendorf (67),	16
Photographie 2 : Fascine avec pieux vivants. Source : SMBV du Dun et de la Veules (Ouvry et al., 2012)	16
Photographie 3 : Haie de Saules à Alteckendorf (67)	16
Photographie 4 : Haie de <i>Miscanthus giganteus</i> à Bitchhofen (67)	16
Photographie 5 : Association de haie et fascine à Ringeldorf (67)	17
Photographie 6 : Association d'une bande enherbée, d'une fascine et d'une haie arbustive à Mertzwiller (67)	17
Photographie 7 : Fascine 1 (F1), de 140 m de long, située entre une parcelle de blé (amont) et une parcelle de maïs (aval), Ettendorf (67)	26
Photographie 8 : Fascine 2 (F2), de 60 m de long, à l'amont du site d'étude, présente un état d'altération très avancé. Au second plan, le village de Ringeldorf (67)	27
Photographie 9 : Haie de Saule à Alteckendorf, à l'aval d'une parcelle de betterave labourée.	60
Photographie 10 : vue d'ensemble de la haie ancienne retenue à Breuschwickersheim, depuis la parcelle de blé à l'aval.	62
Photographie 11 : vue rapprochée de la haie ancienne à Breuschwickersheim. Il est possible d'observer le talus entre la surface amont (en haut à gauche) et la surface aval (en bas à droite).	62
Photographie 12 : terrier de renards au centre de la haie à Breuschwickersheim.	63
Photographie 13 : bande de <i>Miscanthus giganteus</i> à Gressendorf le 06/04/2016	65
Photographie 14 : bande de <i>Miscanthus giganteus</i> (modalité 15), implantée à Grassendorf en 2008.	66
Photographie 15 : tiges au pied de la haie arbustive à Alteckendorf.	68
Photographie 16 : tiges au pied de la bande de <i>Miscanthus</i> à Grassendorf.	68
B. Friconet	104/111

Photographie 17 : Fascine (modalité 2), à Schwindratzheim.	69
Photographie 18 : Fascine (modalité 8), à Schwindratzheim.	69
Photographie 19 : Estimation des taux de couverture au sol, pour la modalité 1 à Schwindratzheim.	70
Photographie 20 : Mesures d'infiltrométrie à Schwindratzheim.	72

Table des figures

Figure 1 : Efficacité des haies et fascines suivant les coefficients de <i>Manning</i> et leurs principales caractéristiques (Ouvry et al., 2012)	19
Figure 2 : Sédimentation des haies et fascines selon les caractéristiques des particules (Ouvry <i>et al.</i> , 2012)	20
Figure 3 : Coefficients de Manning en fonction du débit par unité de largeur mesurés par l'USDA pour le Switchgrass (<i>Panicum virgatum</i>) et le Vétivier (Dabney <i>et al.</i> , 1995) et par l'AREAS pour les fascines et les haies arbustives(Ouvry <i>et al.</i> , 2012)	20
Figure 4 : Coefficients de Manning en fonction du débit par unité de largeur mesurés par Ouvry <i>et al.</i> , (2012) pour les fascines et les haies arbustives et par Richet <i>et al.</i> , (2014), pour différents types de haies herbacées.	21
Figure 5 : Grand domaines morphologiques d'Alsace (A ; Muller <i>et al.</i> , 2012) et sensibilité des sols à l'érosion d'après la méthode MESALES (B ; Van Dijk <i>et al.</i> , 2009)	23
Figure 6 : Localisation du site d'étude et des fascines installées en 2009. Source des données : Fascines : CARA (2016) ; Bdtopo : IGN (2012) ; MNT à 20 mètres de résolution : CIGAL.	25
Figure 7 : Scénarios (SC1 et SC2) et paramètres d'entrés utilisés par le logiciel <i>VFSMOD</i> pour simuler les flux hydro-sédimentaires à l'exutoire de deux surfaces contributives	29
Figure 8 : Chemins d'eau potentiels et aménagements d'hydraulique douce sur l'ensemble de la zone d'étude. Source des données : Fascines : CARA (2016) ; Bdtopo : IGN (2012) ; Données LiDAR : CC de la Basse Zorn et de la Région de Brumath.	32
Figure 9 : Principaux types d'occupation du sol représentés sur la zone d'étude. Source des données : ARAA (2016)	35
Figure 10 : Clés de détermination du groupe hydrologique d'un sol d'après l'USDA-SCS, 1972 (Carluer <i>et al.</i> , 2011)	36
Figure 11 : Principaux types de sols localisés sur le site d'étude. Source des données : ARAA (2012)	37
Figure 12 : Caractéristiques des sols prélevés sur les surfaces contributives 1 et 2 (SC1 et SC2)	38

Figure 13 : Caractérisation des groupes hydrologique selon la texture d'après l'USDA-SCS, 1972, (Carluer <i>et al.</i> , 2011)	38
Figure 14 : Principales clés de détermination du <i>Curve Number</i> d'après l'USDA-SCS, 1972 (Carluer <i>et al.</i> , 2011)	39
Figure 15 : Typologie de l'occupation du sol et Curve Number associé à la surface contributive 1	40
Figure 16 : Typologie de l'occupation du sol et Curve Number associé à la surface contributive 2	40
Figure 17 : Valeurs du facteur C selon le type de couverture et le mois de l'année d'après Van Dijk, (2011)	42
Figure 18 : Typologie de l'occupation du sol et Facteur C associé à la surface contributive 1	43
Figure 19 : Typologie de l'occupation du sol et Facteur C associé à la surface contributive 2	43
Figure 20 : Paramètres d'entrée du modèle VFSMOD pour les scénarios associés aux surfaces contributives 1 et 2	44
Figure 21 : Résultats des débits solides et liquides, simulés à partir du modèle <i>VFSMOD</i> à l'exutoire des surfaces contributives SC1 et SC2	46
Figure 22 : Principales caractéristiques des flux et taux de transfert des surfaces contributives SC1 et SC2	47
Figure 23 : Principaux flux et stocks sédimentaires associés aux deux scénarios à l'exutoire des surfaces contributives 1 et 2	49
Figure 24 : Bilan de l'efficacité des fascines 1 et 2, d'après les débits solides simulés par <i>VFSMOD</i> à l'exutoire des surfaces contributives 1 et 2 (SC1 et SC2), les taux de transfert calculé à partir de l'équation d'Ouvry <i>et al.</i> , (2012) et la capacité de stockage à l'amont des fascines.	50
Figure 25 : schéma des dispositifs d'hydraulique douce installés à Schwindratzheimen 2013.	54
Figure 26 : description des dispositifs d'hydraulique douce installés à Schwindratzheimen.	54

Figure 27 : présentation des différentes modalités retenues pour l'étude	57
Figure 28 : Localisation des dispositifs d'hydraulique douce retenus pour l'étude.	58
Figure 29 : Localisation des fascines (modalités 12 et 13) à Ettendorf.	59
Figure 30 : Localisation de la haie arbustive retenue pour l'étude à Alteckendorf.	60
Figure 31 : Localisation de la haie ancienne retenue à Breuschwickersheim.	61
Figure 33 : synthèse des trois composantes permettant de calculer la rugosité d'un dispositif d'hydraulique douce, selon la méthode appliquée pour cette étude.	67
Figure 34 : dimensions des dispositifs végétalisés mesurées sur le terrain	78
Figure 35 : relevés des densités et diamètres moyens pondérés des dispositifs d'hydraulique douce.	78
Figure 36 : dimensions et états des fascines relevés sur le terrain.	80
Figure 37 : rugosité de surface associée à la végétation au sol sur l'ensemble des sites d'étude.	80
Figure 38 : mesures à la chaînette et résultats de calcul des rugosités aléatoires pour l'ensemble des sites d'étude.	81
Figure 39 : textures et taux de matières organiques prélevés sur le terrain et analysés (SADEF) pour l'ensemble des sites d'étude.	82
Figure 40 : densités apparentes calculées sur l'ensemble des sites d'étude.	82
Figure 41 : conductivités hydrauliques à saturation calculées à partir des mesures d'infiltrométrie réalisées sur l'ensemble des sites d'étude.	83
Figure 42 : coefficients de Manning associés à la végétation (n_{veg}) pour l'ensemble des sites d'étude.	84
Figure 43 : coefficients de Manning associés à la rugosité de surface pour l'ensemble des sites d'étude.	84
Figure 44 : coefficients de Manning associés à la rugosité du sol pour l'ensemble des sites d'étude.	86

Figure 45 : coefficients de Manning résultant de la combinaison de la végétation, de la rugosité de surface, et du sol.	87
Figure 46 : Bilan de l'efficacité des différents dispositifs d'hydraulique douce sur le ralentissement hydraulique.	88
Figure 47 : coefficients de Manning calculés pour une parcelle de maïs labourée	89
Figure 48 : efficacité d'interception des sédiments, calculée à partir du STI, pour tous les dispositifs	89

Table des matières

Remerciements.....	4
Introduction.....	6
1. État de l'art.....	10
1.1. À l'origine des coulées d'eaux boueuses, le ruissellement érosif.....	10
1.1.1. Les Coulées d'Eaux Boueuses (CEB).....	10
1.1.2. L'érosion hydrique des sols en régions de grandes cultures.....	10
1.1.3. Une tendance à une intensification des événements.....	12
1.1.4. Présentation de différents modèles de ruissellement et d'érosion des sols.....	12
1.2. L'hydraulique douce pour lutter contre les coulées d'eaux boueuses.....	15
1.2.1. Typologie des principaux dispositifs d'hydraulique douce.....	15
1.2.2. Méthodes de calcul de l'efficacité d'un dispositif d'hydraulique douce.....	18
2. Rôle des surfaces contributives sur l'efficacité de rétention en sédiments d'un dispositif d'hydraulique douce de type fascine.....	22
2.1. Présentation du site d'étude.....	22
2.1.1. Contexte régional.....	22
2.1.2. Ettendorf, une commune particulièrement vulnérable.....	22
2.1.3. Stratégies de lutte contre les coulées d'eaux boueuses.....	24
2.1.4. Présentation des dispositifs retenus pour l'étude.....	24
2.2. Méthode.....	28
2.2.1. Démarche de l'étude.....	28
2.2.2. Présentation du modèle VFSSMod.....	28
2.2.3. Acquisition des données et paramètres d'entrée du modèle.....	30
2.2.4. Estimation de l'efficacité potentielle des dispositifs d'hydraulique douce.....	45
2.3. Résultats.....	46

2.3.1. Résultats des flux hydro-sédimentaires à l'exutoire des surfaces contributives.....	46
2.3.2. Évaluation de l'efficacité des dispositifs.....	47
2.4. Conclusion.....	51
3. Évaluation de l'efficacité de rétention en sédiments par différents dispositifs d'hydraulique douce dans le Bas-Rhin.....	53
3.1. Présentation des dispositifs d'hydraulique douce.....	53
3.1.1. Le dispositif vitrine d'aménagements d'hydraulique douce de Schwindratzheim.....	53
3.1.2. Choix et présentation des autres sites étudiés dans le Bas-Rhin.....	55
3.2. Méthode et outils.....	67
3.2.1. Démarche de l'étude.....	67
3.2.2. Protocole d'observation, de mesures et de prélèvements.....	68
3.2.3. Méthode de calcul de l'efficacité des dispositifs d'hydraulique douce.....	74
3.3. Résultats.....	78
3.3.1. Résultats des données collectées sur le terrain.....	78
Dimensions des dispositifs végétalisés (haies et bandes enherbées).....	78
3.3.2. Résultats de l'efficacité des dispositifs d'hydraulique douce.....	83
3.4. Conclusion et perspective.....	90
Bibliographie.....	92
ANNEXES.....	96
Tables.....	104
Table des photographies.....	104
Table des figures.....	106