



FASCINES & HAIES POUR RÉDUIRE LES EFFETS DU RUISSELLEMENT ÉROSIF

CARACTÉRISATION DE L'EFFICACITÉ ET CONDITIONS D'UTILISATION



JF. OUVRY
JB. RICHT
O. BRICARD
M. LHÉRITEAU
M. BOUZID
M. SAUNIER



REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient toutes les personnes ayant contribué à cette étude, à savoir, les agriculteurs qui ont permis la réalisation des expérimentations sur leurs parcelles, les techniciens et responsables des syndicats de bassins versants qui ont collaboré aux essais et aux choix des sites, les membres du comité de pilotage et du comité scientifique, les stagiaires qui ont participé et aidé à la réalisation des expérimentations, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce rapport et à la relecture.

Cette étude n'aurait pu être réalisée sans le soutien des partenaires financiers et de leurs techniciens, que sont l'Union européenne par l'intermédiaire du FEDER, la Région Haute-Normandie, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, et les Départements de Seine-Maritime et de l'Eure, qu'ils en soient remerciés.



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne. L'Europe s'engage en Haute-Normandie avec la Fonds européen de développement régional.

Réalisation : Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols (AREAS)
2 avenue Foch 76460 St Valery en Caux - Tél. : 02 35 97 25 12 - Fax : 02 35 97 25 73 - contact@areas.asso.fr - www.areas.asso.fr

Crédit photos : AREAS sauf mentions particulières

Création graphique & maquette : www.nord-ouest-creation.fr

Impression : imprimerie Gabel

Imprimé sur du papier 100% recyclé avec des encres végétales par l'imprimerie **GABEL** labellisée **IMPRIM'VERT**

Avril 2012 - Reproduction soumise à autorisation

SOMMAIRE

INTRODUCTION P 5

1 - Problématique générale p 5

2 - Objectifs de ce programme de recherche sur les haies à plat et les fascines p 5

PARTIE 01 P 7

TYPOLOGIE DES HAIES ET DES FASCINES VIS-À-VIS DE L'ÉROSION DES SOLS ET SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1 - Définitions et précisions du vocabulaire concernant les objets testés p 8

2 - Synthèse bibliographique succincte p 12

2.1 - Fascines et réduction des vitesses p 12

2.2 - Haies : réduction des vitesses et augmentation de la sédimentation p 12

2.3 - Haies et infiltration p 14

PARTIE 02 p 15

APPROFONDISSEMENT DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES - RÉSULTATS D'EXPÉRIMENTATION

1 - Conduite des essais - matériel et méthode p 16

1.1 - Simulateur de ruissellement p 16

1.2 - Mesures effectuées p 17

1.3 - Précision des mesures p 18

1.4 - Choix des débits testés p 18

1.5 - Protocole utilisé pour les essais de sédimentation p 18

1.6 - Description des sites testés p 21

2 - Résultats p 23

2.1 - Réduction des vitesses d'écoulement p 23

2.1.1 - Exemples de l'impact de la mise en place d'une fascine sur la hauteur de lame d'eau et la vitesse d'écoulement p 23

2.1.2 - Détermination des vitesses d'écoulement juste à l'amont des dix objets testés p 24

2.1.3 - Estimation des coefficients de Manning p 25

2.1.4 - Analyse des résultats pour les haies p 26

2.1.5 - Comparaison des résultats avec les données de la bibliographie p 27

2.1.6 - Analyse des résultats pour les fascines p 27

2.1.7 - Vérification des coefficients de Manning expérimentaux par modélisation hydraulique p 30

2.1.8 - Bilan sur le ralentissement dynamique p 30

2.2 - Réduction du transport solide : sédimentation p 31

2.2.1 - Observations spatiales et temporelles p 31

2.2.2 - Analyse de l'effet de la granulométrie des agrégats sur le taux de transfert p 32

2.2.3 - Analyse de l'effet du débit spécifique sur le taux de transfert p 33

2.2.4 - Analyse des concentrations maximales en sortie p 34

2.2.5 - Confrontation des résultats obtenus avec ceux calculés à partir du formalisme de DABNEY *et al.* (1995) p 35

2.2.6 - Bilan sur la sédimentation p 35

2.3 - Evaluation de la fonction d'infiltration au pied des haies et des fascines	p 36
2.3.1 - Limites de la mesure d'infiltration	p 36
2.3.2 - Résultats généraux	p 36
2.3.3 - Bilan sur l'infiltration	p 37

PARTIE 03

p 39

ENSEIGNEMENTS PRATIQUES

1 - Synthèse des points forts et points faibles des fascines et des haies pour réduire l'érosion des sols et le ruissellement	p 40
2 - Enseignements sur les conditions d'efficacité optimale pour la sédimentation	p 43
2.1 - Cas des fascines	p 43
2.1.1 - La qualité du fagot de remplissage	p 43
2.1.2 - L'absence de court circuit et une longueur suffisante de fascine	p 43
2.1.3 - La pente amont et son évolution dans le temps	p 44
2.1.4 - La taille des éléments à piéger	p 44
2.1.5 - Le débit de ruissellement	p 44
2.1 - Cas des haies	p 45
3 - Enseignements sur les localisations les plus efficaces	p 46
3.1 - Localisations pertinentes des fascines et des haies vis-à-vis des zones à risque élevé d'érosion et générant des débits limités	p 46
3.2 - Autres localisations pertinentes pour la protection rapprochée d'enjeux	p 46
4 - Bilan des utilisations pertinentes	p 48
5 - Association de haies, de fascines et d'autres zones tampons	p 48
5.1 - Association haie et fascine	p 49
5.2 - Association fascine et plançons de saule en parallèle	p 49
5.3 - Association haie ou fascine et bande enherbée	p 50
5.4 - Association fascine ou haie et bande boisée	p 50
5.5 - Association fascine, haie et bande enherbée	p 50
5.6 - Association fascine, haie et bande boisée	p 51
5.7 - Association haie ou fascine et chenal enherbé sur talweg	p 51
5.8 - A l'échelle du bassin versant, insertion d'une haie ou d'une fascine à but sédimentaire dans un aménagement linéaire à but paysager, cynégétique, énergétique ou autre	p 51
6 - Exemple d'analyse coût - bénéfice appliquée au cas d'une fascine située en aval d'une parcelle cultivée, pour protéger un lotissement des coulées de boue	p 52
6.1 - Présentation de l'étude de cas	p 52
6.1.1 - Hypothèses posées	p 52
6.1.2 - Scénarii testés	p 54
6.1.3 - Matériel et données utilisés	p 54
6.2 - Résultats techniques	p 54
6.2.1 - Méthode d'estimation des quantités de sédiments produits par l'érosion	p 54
6.2.2 - Estimation des quantités de sédiments à curer dans le lotissement avec mise en place de la fascine	p 56
6.3 - Résultats économiques	p 56
6.3.1 - Coût de curage dans le lotissement avec et sans mise en place de la fascine	p 56
6.3.2 - Coût de mise en place et d'entretien de la fascine	p 57
6.3.3 - Bilan coût - bénéfice sur la base des coûts de curage	p 57
6.3.4 - Autres scénarii possibles	p 59
6.4 - Bilan de la démarche "analyse coût - bénéfice"	p 59
CONCLUSION	P 60
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	P 62
ANNEXES	P 64

INTRODUCTION

1 - PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

Dans les bassins versants de grande culture sur limons battants, les phénomènes d'érosion des sols et de ruissellements intenses conduisent à la multiplication de coulées de boue, à la diminution de la fertilité des sols et à l'augmentation des pollutions des eaux, que ce soit en France ou en Europe. Sur les territoires érosifs, l'acuité de ces coulées d'eaux boueuses a conduit à la mise en place de stratégies d'action qui reposent sur plusieurs volets, dont un vise en particulier la réduction de l'aléa. Ce volet est généralement décliné en deux parties.

La première partie classique concerne la création d'ouvrages de laminage de crue, qualifiés de "structurants", pour réduire les débits de pointe et protéger la population et les activités humaines.

La seconde partie repose sur le développement de mesures préventives combinées, avec d'une part, des mesures favorables à l'infiltration des eaux de pluie à la source, qu'elles soient agricoles ou urbaines, et d'autre part la création de petits aménagements hydrauliques, comme les chenaux enherbés sur talweg, les bandes enherbées, les haies et les fascines qui constituent des Zones Tampons telles qu'elles sont définies par le CORPEN (2007). Ces petits aménagements sont couramment appelés "Aménagements d'Hydraulique Douce" en Haute-Normandie.

Ces aménagements sont complémentaires et indissociables des mesures favorisant l'infiltration, et des ouvrages de laminage. Ils constituent un outil fondamental dans la prévention de l'érosion et des inondations par leurs fonctions hydriques : ralentissement et infiltration du ruissellement et piégeage des Matières en Suspension (MES). Ils assurent de multiples rôles :

- ▶ *réduire directement l'arrachement de particules de terre ;*
- ▶ *réduire les transferts des particules et des molécules associées (comme certains produits phytosanitaires) hors des parcelles et donc protéger aussi les cours d'eau et les avens karstiques ;*
- ▶ *ralentir les écoulements vers l'aval ;*
- ▶ *infiltrer une partie des écoulements et donc optimiser le volume des ouvrages structurants, ce qui a des répercussions économiques ;*
- ▶ *diminuer fortement l'envasement des ouvrages et donc les coûts de curage, notamment si les produits de curage sont envoyés en décharge ;*
- ▶ *accroître la biodiversité sur les territoires d'openfields de nos régions du nord de la France, en créant un nouveau maillage d'éléments linéaires de bouts de champs qui peut très bien s'inscrire dans une trame verte sur le territoire ;*
- ▶ *diversifier les paysages de ces plaines.*

Les constats de terrain montrent que, sous certaines conditions de mise en œuvre et de gestion, les aménagements d'hydraulique douce s'avèrent particulièrement efficaces. Les mesures à base d'herbe, chenaux et bandes enherbées, ont déjà fait l'objet de nombreuses recherches depuis 15 ans et leurs caractéristiques ont été précisées par les scientifiques (GRIL et Duvoux, 1991 ; CORPEN, 2007 ; LACAS, 2005) et synthétisées par Ouvry *et al.*(2010). Les connaissances sur les fonctions hydriques des Zones Tampons Enherbées sont donc acquises pour l'essentiel.

Mais les haies et fascines sont peu, voire mal utilisées et peinent à se développer à grande échelle. Cela résulte, en particulier, d'un manque de connaissances précises de leurs caractéristiques hydrauliques et des conditions pertinentes de leur mise en œuvre.

L'objet de ce projet est de préciser les caractéristiques fonctionnelles des haies et des fascines vis-à-vis des ruissellements et de l'érosion, et d'en déduire des enseignements concrets et pratiques pour rendre leur utilisation plus fréquente et plus efficiente.

2 - OBJECTIFS DE CE PROGRAMME DE RECHERCHE SUR LES HAIES À PLAT ET LES FASCINES

Le premier objectif est de donner aux techniciens les connaissances sur les caractéristiques utiles et sur les paramètres de dimensionnement afin que les haies et les fascines soient efficaces pour réduire la charge solide du ruissellement. Ces résultats s'adressent aux techniciens des collectivités et des bureaux d'études qui aménagent les bassins versants. Le second objectif est de préciser les conditions optimales d'efficacité de ces aménagements et les localisations les plus pertinentes.

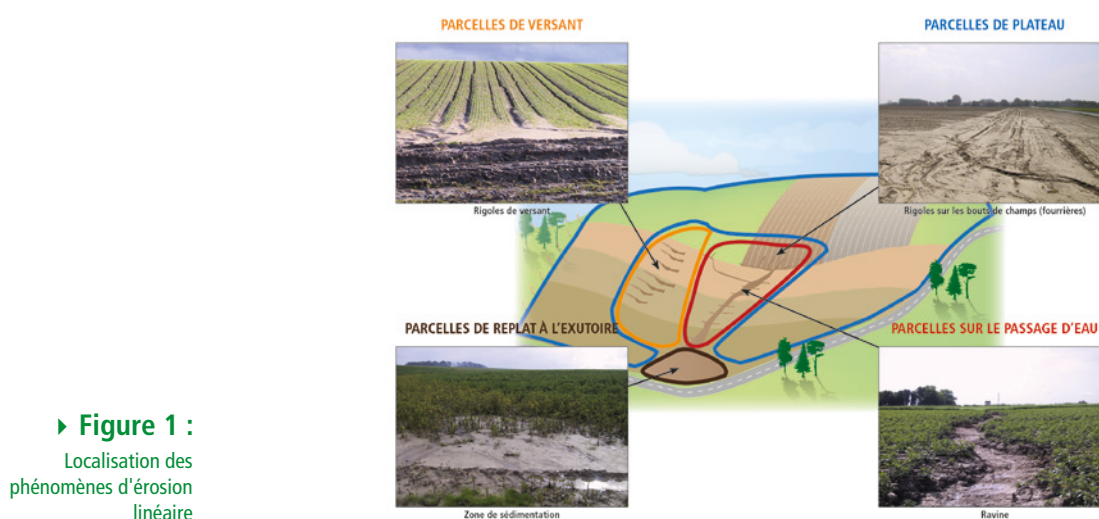
Cette synthèse est présentée en trois parties, destinées chacune à des acteurs différents.

- ▶ La première partie fixe le cadre. Elle définit quelles haies et fascines ont fait l'objet de ces recherches et rappelle les connaissances scientifiques préalables qui ont servi de base. Elle s'adresse à tout type de lecteur.
- ▶ La seconde partie présente les résultats obtenus pendant les 3 années de recherches expérimentales conduites sur le terrain. Elle précise l'efficacité des haies et des fascines vis-à-vis des écoulements érosifs sur les fonctions de ralentissement dynamique, de sédimentation et d'infiltration. Elle s'adresse en particulier aux spécialistes du ruissellement et de l'érosion.
- ▶ La troisième partie consiste à tirer les enseignements de ces résultats pour définir les caractéristiques et les conditions optimales de l'utilisation des haies et fascines pour agir sur le ruissellement érosif. Elle s'adresse plus spécifiquement aux techniciens de bassins versants et aux acteurs de terrain.

Cette synthèse est extraite du rapport d'étude complet, téléchargeable sur le site de l'AREAS ([http : //www.areas.asso.fr](http://www.areas.asso.fr)).

Contours et limites des objectifs et des résultats

Le cadre de ce travail correspond aux plaines et collines constituées de limons battants et portant une agriculture tournée vers les grandes cultures. Ces territoires sont fréquemment sujets aux phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols, processus abondamment décrits depuis 30 ans, notamment en Normandie, en Artois, dans le Nord Pas de Calais, en moyenne Belgique, en Alsace, en Bretagne, et dans le sud-ouest (Lauragais en particulier), parfois sous des conditions climatiques différentes. Ce sont des territoires d'openfields où les haies, les talus, et d'une façon générale le bocage, n'existent pas ou plus. L'étude s'est focalisée sur les phénomènes d'érosion linéaire, qu'ils soient de versant avec la formation de rigoles en plein champ, ou qu'ils soient liés à la concentration des ruissellements sur les talwegs avec formation de ravines, ou sur les fourrières (bouts de champs) avec formation d'importantes rigoles (Figure 1). Le ruissellement arrache et charrie de grandes quantités de terre. Ces MES sont constituées d'agrégats grossiers (> 125 µm) et de peu de particules élémentaires. Ces agrégats représentent un problème majeur pour les collectivités lorsque les dépôts se produisent dans les ouvrages de laminage de crue, dans les réseaux, sur les routes, dans les propriétés publiques et privées et surtout lorsqu'ils atteignent la ressource en eau via le karst ou directement dans les cours d'eau. Les coûts annuels d'entretien prennent de l'importance et la recherche de solutions préventives revêt un grand intérêt.



▶ **Figure 1 :**

Localisation des phénomènes d'érosion linéaire

Les travaux scientifiques réalisés en Haute-Normandie par LE BISSONNAIS *et al.* (1996), CERDAN (2001) et LEGUEDOIS (2003), démontrent que les concentrations en MES dans les ruissellements sont plus importantes à l'amont des petits bassins versants. C'est effectivement dans ces zones que les haies et les fascines ont commencé à se développer.

Aussi, les travaux réalisés dans le cadre de cette étude ont porté sur des situations similaires : débit peu élevé, charge en MES importante avec des particules grossières et grande largeur d'écoulement en liaison avec la géomorphologie du Pays de Caux. Les conclusions et enseignements tirés des résultats sont directement dépendants des conditions expérimentales, notamment de la gamme des débits testés et ne sont applicables que dans ce type de situation. Toute extrapolation à des débits supérieurs ne peut se faire sans essai et validation, et plus particulièrement pour le cas des haies.

PARTIE 01

TYPOLOGIE DES HAIES ET DES FASCINES VIS-À-VIS DE L'ÉROSION DES SOLS ET SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1 - Définitions et précisions du vocabulaire concernant les objets testés	p 8
2 - Synthèse bibliographique succincte	p 12
2.1 - Fascines et réduction des vitesses	p 12
2.2 - Haies : réduction des vitesses et augmentation de la sédimentation	p 12
2.3 - Haies et infiltration	p 14



PARTIE 01

Typologie des haies et des fascines vis-à-vis de l'érosion des sols et synthèse bibliographique



1 - Définitions et précisions du vocabulaire concernant les objets testés

La **fascine** est un aménagement linéaire constitué de branchages. Positionné en travers du ruissellement, il constitue un obstacle perméable qui freine l'eau. Les fascines dont il est question dans ce document sont des fascines en caisson, c'est-à-dire qu'elles sont constituées de 2 rangées de pieux entre lesquelles on a amassé des branchages de façon à constituer un « fagot ».

On distingue généralement les fascines dites mortes dont tous les constituants sont en bois mort (pieux et fagot) des fascines dites vivantes qui comporte au moins un élément vif : soit les pieux, soit des tiges piquées autour du fagot.

La **haie** anti-érosive est constituée d'un alignement d'arbustes ou d'arbustes avec quelques arbres, se développant sur un tapis de végétation herbacée, l'ensemble ne dépassant pas quelques mètres de large. Nous distinguerons les haies « à plat » des haies « sur talus ». Pour les haies « à plat », c'est la densité de tiges partant du sol qui est un facteur primordial pour l'efficacité hydraulique.

L'enquête de terrain réalisée en 2009 a révélé une grande diversité dans la mise en œuvre des fascines comme des haies arbustives. Aussi, il est nécessaire de définir plus précisément les cas rencontrés et ceux testés dans le cadre de ces travaux, sous l'angle du ruissellement de surface et de l'érosion des sols (Tableaux 1a, 1b, 1c). La typologie suivante inclut des caractéristiques techniques (hauteurs, densités...) pour fixer dès maintenant quelques idées.





FASCINES	
Fascine vivante	Fascine avec pieux vivants courts, dite "classique"  <p>Elle est constituée de 2 rangées de pieux en saule espacées de 0,5 m. Ces pieux font 6 à 8 cm de diamètre et 1,2 à 1,5 m de long. Ils sont enfoncés à une profondeur de plus de 0,5 m dans le sol et dans le bon sens afin qu'ils puissent s'enraciner. Ils sont disposés soit face à face, soit en quinconce. Au milieu, une tranchée est creusée sur 30 cm de profondeur. Le tout est rempli de tiges de saule (ou autre) sur une hauteur totale de 80 cm minimum de façon à obtenir un fagot de 50 cm au-dessus du sol. A la fin, le fagot est compacté mécaniquement et un tasseau attaché entre 2 pieux maintient le tout. Les pieux sont recoupés à la hauteur du fagot.</p> <p><i>C'est ce type de fascine qui a été testé in situ dans le cadre de ces travaux.</i></p>
	Fascine avec pieux vivants longs  <p>Fascine constituée de pieux en saule de 1,5 m de long minimum et non recoupés dans leur hauteur. Cette hauteur libre dépasse de 0,3 à 0,5 m le fagot. Cela permet de venir rehausser et/ou recharger la fascine si c'est nécessaire (par exemple en cas de comblement important à l'amont).</p>

Fascine vivante	<p>Fascine vivante avec reprise des tiges du fagot</p>  <p>Fascine constituée d'un fagot en saule dont les premiers branchages sont enterrés de façon à pouvoir prendre racine et à produire des tiges qui sortiront de terre de chaque côté du fagot, voire plus rarement en son centre. (La reprise des tiges du fagot s'avère souvent médiocre).</p>
	<p>Fascine avec pieux courts vivants, équipée de plançons¹ de saule</p>  <p>Fascine généralement constituée de pieux en saule et complétée par une série de plançons de saule piqués en amont ou en aval. Les plançons prendront racine en complément des pieux, constituant ainsi une haie dense de saule qui assurera le rôle de filtre, une fois les branches du fagot pourries.</p> <p>¹ Le plançon est une branche d'environ 1 m de longueur qu'on coupe du pied mère pour la planter en terre et former une bouture.</p>
Fascine morte	<p>Fascine morte</p>  <p>Fascine constituée de pieux et fagot de bois morts. Les pieux sont généralement en châtaigner ou en acacia. Le fagot peut être de différentes essences. <i>C'est ce type de fascine qui a été utilisé dans les tests sur "fascine portable".</i></p>
Fascine après 10 ans	<p>Fascine après 10 ans</p>  <p><i>Fascine morte après 10 ans</i></p>
	 <p><i>Fascine avec pieux vivants après 10 ans</i> Photo Chambre d'agriculture 76</p> <p>Au bout de 5 à 10 ans, le fagot de la fascine a complètement disparu (sauf si les branchages ont été remplacés au fil du temps). En l'absence d'intervention, il ne reste que les pieux morts ou vifs selon le type de fascine. L'efficacité de filtre de la fascine devient alors très faible vu la densité de tiges en place qui n'est plus que de 2 tiges par mètre linéaire, même si les pieux ont repris.</p>

► **Tableau 1a :**
Typologie des fascines vis-à-vis de l'érosion des sols

HAIES	
Haie à plat très dense - haie ancienne	
	<p>Il s'agit d'une haie implantée à plat sur le sol. Elle est composée d'espèces variées qui présentent la caractéristique d'avoir de nombreux rejets, ou drageons, ou tiges qui partent du collet. Ces types de haies sont qualifiées de denses quand elles contiennent plus de 40 à 50 tiges qui sortent du sol par mètre linéaire. Cette densité est généralement obtenue au bout de 10 ans.</p> <p>Ce type de haie constitue une barrière végétale très efficace vis-à-vis des écoulements concentrés.</p> <p><i>C'est ce type de haie qui a été testé in situ dans le cadre de ces travaux</i></p>
Haie à plat très dense - haie jeune	
 <p style="text-align: center; font-size: small;">Photo CC Caux Vallée de Seine</p>	<p>A la plantation, une haie dense est constituée de 6 pieds au mètre linéaire avec des espèces qui ont la faculté de se densifier du pied. La haie est plantée soit en 2 rangées avec un écartement entre les plants et entre les rangs de 33 cm, soit en 3 rangées avec un écartement entre les plants et entre les rangs de 50 cm. La pratique du recépage des plants facilite la densification du pied de la haie.</p>
Haie à plat peu dense	
	<p>En plaine, une haie implantée perpendiculairement au versant intercepte les ruissellements diffus. Même avec une faible densité de plants, elle est intéressante pour réduire l'érosion des sols grâce à son pouvoir d'infiltration. Elle assure également d'autres fonctions en matière de paysage, de biodiversité...</p>
Haie paysagère ou clôture	
	<p>Haie plantée en limite de propriété pour assurer plusieurs fonctions : servir de clôture végétale, contribuer à l'ornement du jardin et à la biodiversité (à condition de bien choisir les espèces). Elle a une densité de plants faible et ne constitue pas une barrière végétale aux écoulements dont la hauteur de la lame d'eau est inférieure à 0,2 ou 0,3 m.</p>
Haie plantée sur talus	
	<p>La haie (peu dense) est implantée sur un talus de 0,5 à 1,5 m de hauteur.</p> <p>C'est le talus qui joue un rôle hydraulique (obstacle, frein, déviation, infiltration, sédimentation...). La haie, grâce à ses racines, contribue à la solidité du talus et accentue l'infiltration au pied. La présence de végétaux assure aussi d'autres fonctions : brise-vent, paysage, biodiversité, production de bois...</p>

► **Tableau 1b :**
Typologie des haies vis-à-vis de l'érosion des sols

ASSOCIATIONS	
<p>Haie à plat, dense + Fascine</p> 	<p>Associer une fascine et une haie permet d'assurer l'efficacité de l'aménagement dès son installation et pour de très nombreuses années. En effet, la fascine est efficace dès le départ et la haie prend le relais une fois les fagots disparus.</p> <p>Cette association présente aussi l'avantage d'être constituée de plusieurs espèces. Ce qui n'est pas le cas d'une fascine vivante en saule qui est monospécifique.</p>
<p>Haie à plat, dense + Fascine + Bande enherbée</p> 	<p>L'association haie + fascine, décrite précédemment, est complétée du côté aval par une zone enherbée de 3 à 5 m de large. Cette association permet de transformer un écoulement concentré d'épaisseur décimétrique en un écoulement laminaire de faible épaisseur qui s'écoule entre les brins d'herbe comme sur une bande enherbée de bord de champ.</p>
<p>Haie plantée sur talus et fossé d'infiltration</p> 	<p>Associer un fossé discontinu en amont d'une haie sur talus (ou à plat) permet d'accroître l'infiltration des écoulements en cas de sol perméable et de piéger les sédiments dans tous les cas.</p>
<p>Haie multifonctionnelle</p> 	<p>Dans le talweg est installée une association fascine + haie pour freiner les écoulements, favoriser la sédimentation et l'infiltration. En dehors du talweg, la haie est prolongée pour d'autres objectifs : favoriser la biodiversité (auxiliaires de culture, petite faune de plaine...), améliorer le paysage, produire du « bois énergie »...</p>

► **Tableau 1c :**
Typologie des associations à base de haies et fascines vis-à-vis de l'érosion des sols

2 - Synthèse bibliographique succincte

Dans le nord de la France, la réalisation de fascines et de haies répond à la volonté de réduire les impacts des coulées d'eaux boueuses sur les zones à enjeux situées en aval (AUZET, 1987). Ces aménagements répondent aussi au choix des exploitants agricoles de mettre en œuvre des actions en limite de parcelles plutôt que d'implanter des chenaux enherbés au sein des parcelles, ou parfois des bandes enherbées en bouts de champs, même si en réalité ce sont des actions complémentaires (CORPEN, 1997, 2007). De part leur localisation, ces types d'aménagements présentent un intérêt dans les territoires où le processus érosif principal est celui de "l'érosion par ruissellement concentré, notamment de talweg" décrit par de nombreux scientifiques français et internationaux (BOIFFIN *et al.*, 1986, 1988 ; PAPY et BOIFFIN, 1988 ; AUZET *et al.*, 1990 ; DE PLOEY, 1989 ; SOUCHERE, 1995 ; LUDWIG, 1992 ; LE BISSONNAIS, 2003 ; CERDAN, 2001 ; FOSTER, 1990 ; POESEN, 1989 ; BOARDMAN, 2003).

L'utilisation de fascines et de haies pour réduire la charge en MES des écoulements s'appuie sur le concept de barrière végétale, qui cherche à ralentir les écoulements pour provoquer la sédimentation des particules, et à améliorer l'infiltration. C'est un concept très développé sur d'autres parties du globe. Il est basé sur la création d'une structure de dissipation de l'énergie du ruissellement (ROOSE et BERTRAND, 1971 ; ROOSE, 1994). Ces techniques appartiennent au génie écologique (REY, 2005). Localisées sur le chemin de l'eau dans un talweg, elles peuvent apporter des solutions durables pour limiter l'érosion, pour réduire les ruissellements et les transferts de particules. Elles sont complémentaires des pratiques agricoles au sein des parcelles et des autres aménagements de zones tampons (CORPEN, 2007).

2.1 - Fascines et réduction des vitesses

En Allemagne, l'intérêt des fascines utilisées comme barrière aux écoulements a été abordé par MATHEJA et STOSCHEK (1998), dans le cadre d'une étude de dissipation de l'énergie de la houle sur les estrans. Le coefficient de Manning a été calculé à partir de mesures de vitesse sur un modèle physique. Une valeur de $0,8 \text{ s/m}^{1/3}$ a été obtenue (Equation 1). À l'occasion de cette étude, une grille métallique perforée de trous ronds, présentant une ouverture totale de 5,2 % a montré un comportement identique à celui d'une fascine. HUDSON (1981) présente la réalisation de fascines pour corriger les ravines d'érosion. REY (2005) a décrit l'effet bénéfique des fascines, installées dans les ravines des marnes noires de la Haute-Durance sur la formation de dépôts en amont. La sédimentation a été évaluée pendant 2 ans entre $0,06 \text{ m}^3$ et $0,11 \text{ m}^3$ par fascine. En Alsace, PACEVICIUS (2008) a quantifié les volumes de sédiments déposés en amont des fascines, en bas de parcelles cultivées, en zone de limons battants : de 9 à 22 m^3 en quelques années.

Le coefficient de Manning n caractérise les forces de frottement et permet d'estimer les vitesses d'écoulement. Il est calculé au droit de l'obstacle pour chaque débit à partir de l'Equation 1 :

$V=1/n R_h^{2/3} p^{1/2}$	Equation 1 avec :
<ul style="list-style-type: none"> ▶ n : coefficient de Manning ($\text{s/m}^{1/3}$) ; ▶ R_h : rayon hydraulique de l'écoulement = section de l'écoulement/périmètre mouillé (m) ; ▶ V : vitesse d'écoulement au droit de l'obstacle = débit moyen divisé par la section mouillée (m/s) ; ▶ p : gradient d'énergie qui correspond généralement à la pente du terrain (ici approximé par la pente du fond en amont de l'objet). 	

2.2 - Haies : réduction des vitesses et augmentation de la sédimentation

L'effet des arbustes sur la vitesse d'écoulement a été largement étudié dans les cas d'écoulements en rivière ou de champ d'épandage de crue. Le rôle de barrière végétale engendrant un ralentissement est connu, démontré et modélisé (TSUJIMOTO *et al.*, 1992 ; FREEMAN *et al.*, 2000 ; LEE *et al.*, 2000 ; ALLAIN-JEGOU, 2002). Le ralentissement est proportionnel à la densité de tiges qui s'oppose à l'écoulement par unité de largeur traversée. La présence de feuillage renforce l'effet de ralentissement des écoulements. TSUJIMOTO *et al.* (1992) proposent une équation de la vitesse en fonction de la densité de tiges au sol, de leur section, du coefficient de traînée¹ et de la pente. ALLAIN-JEGOU (2002) démontre que le coefficient de traînée est

¹ Une des composantes de toutes les forces de frottement (exprimées par le coefficient de Manning). Le coefficient de traînée correspond aux frottements à travers la végétation et est généralement utilisée par les hydrologues qui travaillent en lit majeur ou mineur des rivières.

en fait assez variable, et qu'il est proportionnel au nombre de Reynolds. FREEMAN *et al.* (2000) obtiennent une équation complexe à 11 paramètres. Leurs expériences ont été conduites dans un chenal avec une densité d'arbustes comprise entre 0,3 et 12 arbustes par m². Les résultats du coefficient de Manning varient entre 0,016 et 0,090 s/m^{1/3}, avec une majorité de valeurs comprises entre 0,030 et 0,070 s/m^{1/3}. Ces résultats indiquent une perméabilité encore élevée entre les arbustes. Mais ces recherches correspondent généralement à des conditions différentes de celles rencontrées sur le terrain en Haute-Normandie.

Le rôle des haies arborées et arbustives sur la sédimentation des particules issues de l'érosion hydrique a été décrit au Nigeria, au Kenya, au Rwanda et aux Philippines où les pertes de terres ont été réduites de 48 à 85 % (PANINGBATAN *et al.*, 1995 ; YOUNG, 1997 ; ANGIMA *et al.*, 2002). Au Rwanda sur forte pente de 27 %, KÖNIG (1992) montre que des haies vives plantées selon les courbes de niveau espacées de 10 m peuvent réduire de plus de 95 % l'érosion en sortie du champ. Avec des conditions similaires, NDAYIZIGIYÉ (1992) cité par ROOSE (1994) démontre que les coefficients de ruissellement sont réduits de 65 à 85 % et que l'érosion est diminuée de plus de 95 %. En Bretagne, CARNET (1978) mesure l'accumulation de dépôts dans les fossés en amont des talus plantés perpendiculaires aux versants.

L'impact des haies n'a été examiné en détail que dans le cas de haies herbacées. Ces techniques sont en effet utilisées en milieux tropicaux et en grande culture aux USA depuis une décennie (ROOSE, 1994 ; DABNEY *et al.*, 1995). Ainsi, le vétiver est souvent utilisé en haie de bord de champ pour retenir les particules de sol issues de l'érosion sous climat tropical humide (ROOSE, 1994). Ces techniques aboutissent à la constitution progressive de terrasses sur les versants. Les mesures de sédimentation en amont de ces barrières donnent des réductions du ruissellement de 30 à 60 %, et des réductions du taux d'érosion à l'échelle de la parcelle de 70 à 90 % (ROOSE, 1994 ; KÖNIG, 1992). Aux USA, DABNEY *et al.* (1995 et DABNEY, 1999) ont étudié en détail des haies herbacées à base de panic érigé, miscanthus, fétuque élevée et vétiver. Leurs rôles sur le ralentissement dynamique et la sédimentation sont démontrés et modélisés. DABNEY *et al.* (1995) ont caractérisé les coefficients de rugosité de ces haies herbacées en fonction des débits. D'après leurs travaux de simulation de ruissellement à différents débits (10 à 45 l/s/ml), avec diverses concentrations en MES, dans un chenal similaire à celui utilisé pour nos essais, ils montrent que le taux de sédimentation suit globalement l'Équation 2, avec les paramètres donnés dans le Tableau 2. Il est à noter que la granulométrie considérée est la granulométrie apparente, ou granulométrie des agrégats, par opposition à la granulométrie des particules élémentaires d'un sol ou d'un sédiment.

$\frac{C_{out,k}}{C_{in,k}} = \exp\left(\frac{V_k \beta_k L}{q}\right)$	Équation 2 avec :
---	-------------------

- ▶ *k* : fraction granulométrique considérée
- ▶ *C_{in,k}* : concentration (g/l) en sédiments entrant pour la fraction granulométrique *k* ;
- ▶ *C_{out,k}* : concentration (g/l) en sédiments sortant pour la fraction granulométrique *k* ;
- ▶ *V_k* : vitesse (m/s) de sédimentation des particules pour la fraction granulométrique considérée *k* ;
- ▶ *L* : longueur (m) de sédimentation, c'est-à-dire longueur entre le ressaut hydraulique et la haie ;
- ▶ *q* : débit (m³/s/m) par unité de largeur ;
- ▶ *β_k* : constante dépendante de la fraction granulométrique considérée *k*.

k	µm	> 125	63 - 125	32 - 63	16 - 32	< 16
<i>V_k</i>	m/s	0,01400	0,00645	0,00222	0,00047	0,00013
<i>β_k</i>		0,80	0,69	0,86	1,85	4,69

▶ **Tableau 2 :**
Valeurs des paramètres de l'Équation 2

Avec ce résultat, DABNEY *et al.* montrent que pour une fraction granulométrique donnée, l'efficacité relative de la sédimentation est indépendante de la concentration totale en MES arrivant à la haie. De même, la pente n'intervient pas directement. L'efficacité ne dépend que du débit par unité de largeur, et de la longueur de la zone d'eau calme à l'amont de la haie. Cela suppose néanmoins de connaître la granulométrie des particules et agrégats transportés par les ruissellements érosifs.

A l'échelle des bassins versants en région bocagère, MEROT (1978, 1999) a démontré que la présence de haies sur talus a un impact positif sur la dynamique des crues par la combinaison du ralentissement, de l'allongement du parcours du ruissellement et de l'infiltration.

2.3 - Haies et infiltration

En matière de capacité d'infiltration, dans des systèmes agroforestiers, ALEGRE *et al.* (1996) montrent que la conductivité hydraulique à saturation à proximité d'une haie arbustive au Pérou varie de 180 à 500 mm/h ; KIEPPE (1995) - cité par CAUBEL (2001) - a mesuré un accroissement de l'infiltration au pied d'une haie, dans l'horizon 0-30 cm de 30 % en saison sèche, et de 94 % en saison humide, ainsi qu'un doublement de la conductivité hydraulique à saturation.

A l'échelle de bassin versant en région bocagère, MEROT (1978) a démontré que la présence de talus plantés perpendiculaires aux versants permet de limiter le coefficient de ruissellement des petites crues à 5-6 % lorsque la densité de haies est élevée, ce qui n'est pas le cas lorsque le linéaire de haies sur talus est faible. En outre, il montre que la présence d'un linéaire important de haies sur talus réduit le débit d'un facteur 1,5 à 2 par rapport au bassin versant non bocager. Pour ces talus plantés, CAUBEL (2001) mesure des conductivités hydrauliques à saturation à 2 m des haies, de $4,5 \cdot 10^{-5}$ m/s dans l'horizon 50-100 cm, et de $0,3 \cdot 10^{-5}$ m/s dans l'horizon inférieur.

Sous haie herbacée implantée sur sol limoneux, RACHMAN *et al.* (2004) obtiennent des valeurs de conductivité hydraulique à saturation très élevées en surface (668 mm/h), et qui diminuent rapidement avec la profondeur. Ils démontrent l'importance de l'accroissement de la macroporosité des sols en parallèle avec ces valeurs de perméabilité.

L'examen de la bibliographie confirme qu'il existe peu de références scientifiques et techniques précises sur l'effet des fascines et des haies arbustives denses, telles qu'elles sont utilisées en région érosive de grande culture sous climat océanique du nord de la France, ou applicable à ce type de région. Ce constat positionne l'objet de ce travail qui est de caractériser dans ce type de région :

- ▶ *le ralentissement des vitesses et le coefficient de rugosité de Manning en fonction du débit spécifique et des densités des objets ;*
- ▶ *le taux de sédimentation en amont des barrières végétales en fonction du débit spécifique et de la densité des objets ;*
- ▶ *l'infiltration au pied des fascines et des haies arbustives denses à plat en fonction du débit spécifique.*

PARTIE 02

APPROFONDISSEMENT DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES - RÉSULTATS D'EXPÉRIMENTATION

1 - Conduite des essais - matériel et méthode	p 16
1.1 - Simulateur de ruissellement	p 16
1.2 - Mesures effectuées	p 17
1.3 - Précision des mesures	p 18
1.4 - Choix des débits testés	p 18
1.5 - Protocole utilisé pour les essais de sédimentation	p 18
1.6 - Description des sites testés	p 21
2 - Résultats	p 23
2.1 - Réduction des vitesses d'écoulement	p 23
2.1.1 - Exemples de l'impact de la mise en place d'une fascine sur la hauteur de lame d'eau et la vitesse d'écoulement	p 23
2.1.2 - Détermination des vitesses d'écoulement juste à l'amont des dix objets testés	p 24
2.1.3 - Estimation des coefficients de Manning	p 25
2.1.4 - Analyse des résultats pour les haies	p 26
2.1.5 - Comparaison des résultats avec les données de la bibliographie	p 27
2.1.6 - Analyse des résultats pour les fascines	p 27
2.1.6.1 - Effet de la compaction des fascines sur la densité interne	p 27
2.1.6.2 - Effet de la densité interne des fascines sur les vitesses et les coefficients de Manning	p 28
2.1.6.3 - Comparaison des résultats avec les données bibliographiques	p 29
2.1.6.4 - Analyse des résultats pour les fascines in situ	p 29
2.1.7 - Vérification des coefficients de Manning expérimentaux par modélisation hydraulique	p 30
2.1.8 - Bilan sur le ralentissement dynamique	p 30
2.2 - Réduction du transport solide : sédimentation	p 31
2.2.1 - Observations spatiales et temporelles	p 31
2.2.2 - Analyse de l'effet de la granulométrie des agrégats sur le taux de transfert	p 32
2.2.3 - Analyse de l'effet du débit spécifique sur le taux de transfert	p 33
2.2.4 - Analyse des concentrations maximales en sortie	p 34
2.2.5 - Confrontation des résultats obtenus avec ceux calculés à partir du formalisme de DABNEY <i>et al.</i> (1995)	p 35
2.2.6 - Bilan sur la sédimentation	p 35
2.3 - Evaluation de la fonction d'infiltration au pied des haies et des fascines	p 36
2.3.1 - Limites de la mesure d'infiltration	p 36
2.3.2 - Résultats généraux	p 36
2.3.3 - Bilan sur l'infiltration	p 37



PARTIE 02

Approfondissement des connaissances scientifiques - Résultats d'expérimentation

1 - Conduite des essais - matériel et méthode

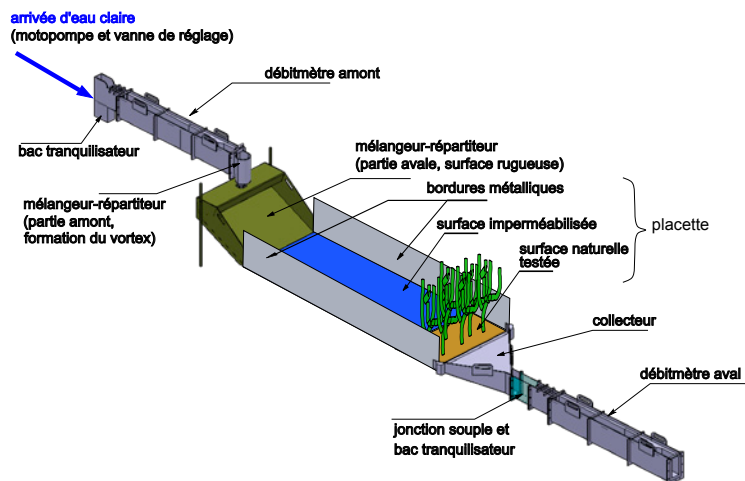
Les essais ont été réalisés à travers des haies et des fascines en situation réelle, plantées en bordure de champ, avec un simulateur de ruissellement spécifique permettant de recréer un débit continu et connu, tant en entrée qu'en sortie.

1.1 - Simulateur de ruissellement

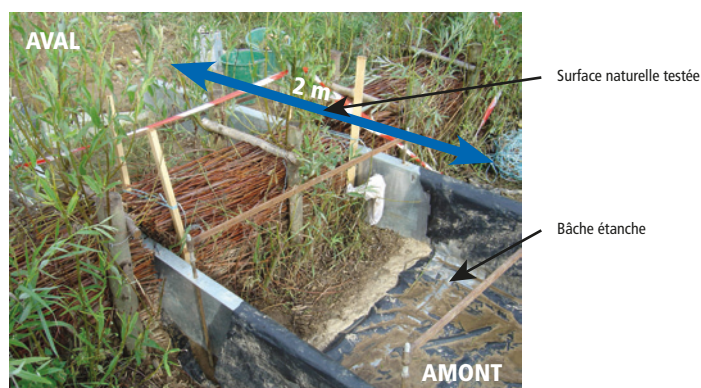
Un simulateur de ruissellement spécial a été construit selon un modèle de l'Irstea anciennement Cemagref, (SOUILLER *et al.*, 2002). Il permet de créer un ruissellement dans une « placette » de largeur réglable de 0,3 à 1 m et sur une longueur de 6 m. Cette « placette » est délimitée latéralement par deux tôles verticales enfoncées de 10-15 cm de profondeur dans le sol (Figure 2).

Les 4 premiers mètres de la « placette » sont rendus étanches par la mise en place d'une bâche de façon hermétique pour éviter l'érosion. Seuls les 2 derniers mètres qui portent la haie ou la fascine correspondent à la « surface naturelle testée ». Cette surface généralement comprise entre 2 et 2,5 m² a servi à faire les mesures d'infiltration (Figure 3).

Un soin tout particulier a été apporté à la maîtrise des pertes latérales, des pertes par la présence de galeries de petits mammifères et des écoulements préférentiels.



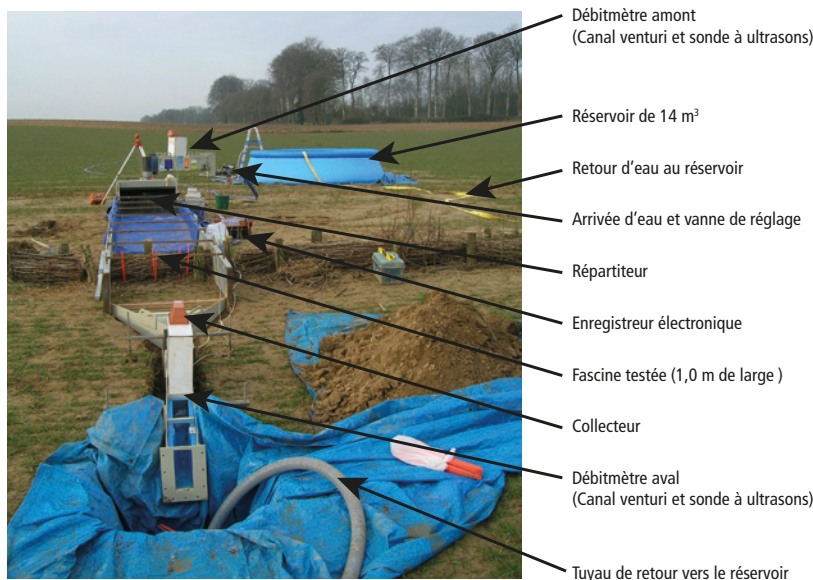
► **Figure 2 :**
Schéma des pièces
du simulateur de
ruissellement permettant
la circulation de l'eau
autour de l'objet testé



► **Figure 3 :**
Vue latérale de la
« surface naturelle
testée »
Photo ARAA

Les débits entrants et sortants de la « placette » sont mesurés en continu à l'aide de deux canaux venturi¹ à section exponentielle de 9 cm de large, équipés de capteurs à ultrasons² pour la mesure de la hauteur d'eau (Figure 2). La hauteur d'eau est mesurée chaque seconde et une moyenne est enregistrée toutes les dix secondes sur un enregistreur électronique³.

L'eau est utilisée en circuit fermé à l'aide d'un réservoir et de deux motopompes. L'une alimente le débitmètre amont, l'autre refoule l'eau depuis une fosse creusée à la sortie du débitmètre aval vers le réservoir (Figure 4). 10 à 30 m³ d'eau sont nécessaires par site, selon l'importance des pertes par infiltration. Chaque pompe permet d'injecter un débit maximal de 6 l/s. Le débit d'entrée est réglé à l'aide de la vanne et du régime moteur de la motopompe amont. La stabilité du débit amont sur la durée des observations a généralement été satisfaisante. Au sein de la gamme des débits possibles entre 0,3 l/s et 6 l/s, 4 à 8 débits différents ont été testés. L'ensemble « mélangeur – répartiteur » assure un brassage et une répartition homogène du flux d'eau sur toute la largeur de la « placette ». La Figure 4 montre le dispositif complet.



► **Figure 4 :**
Dispositif complet du simulateur de ruissellement vu depuis l'aval (Saint-Gilles-de-la-Neuville)

En fin d'essai, avant le démontage du dispositif, la « placette » est alimentée en eau par les deux motopompes à la fois, permettant une observation de l'aménagement sous un flux d'environ 12 l/s ± 1 l/s.

1.2 - Mesures effectuées

Les débits entrants et sortants sont mesurés. En plus pour chaque débit étudié, au niveau de chacune des 5 entretoises, les lignes d'eau sont mesurées à la verticale de 5 points ; soit 125 points de mesure par débit (Figure 6).



► **Figure 5 :**
Le canal de mesure à l'amont d'une fascine, vue des entretoises et de la bêche

► **Figure 6 :**
Lecture de la hauteur d'eau tous les 20 cm sur une entretoise

1 Modèle : canal venturi expo type I, gamme de mesures : 0,06 l/s à 6 l/s, fabriqué par ISMA.

2 Modèle P43F4Y, gamme de mesures réglées sur 200 mm – 829 mm, précision de la mesure ± 1,26 mm, fourni par ISMA.

3 Modèle DLK102, fabriqué par ISMA.

Pour chacun des débits explorés, après une phase d'imbibition de plusieurs dizaines de minutes, le débit d'entrée est maintenu constant et lorsque le régime permanent est établi, les observations commencent : mesure des niveaux d'eau et de la position du ressaut hydraulique.

1.3 - Précision des mesures

Les caractéristiques techniques des capteurs ultrasons donnent une incertitude de ± 0,2 %, ce qui correspond à une incertitude maximale de ± 1,258 mm par capteur. Dans le cas le plus défavorable, si l'incertitude de chacun des deux capteurs se cumule, l'incertitude totale passe à ± 2,52 mm. La conversion des hauteurs d'eau en débit par la courbe d'étalonnage du constructeur, puis la correction avec le tarage réalisé sur le terrain, donnent l'échelle d'incertitude proportionnelle au débit.

1.4 - Choix des débits testés

La gamme des débits retenue pour ces expériences est comprise entre 0,5 l/s/ml et 12 l/s/ml, à laquelle s'ajoute une valeur à 18 l/s/ml sur la fascine de 0,3 m de large testée à La Gaillarde. Ces valeurs de débits spécifiques ont été choisies en rapport avec l'analyse statistique des débits mesurés sur le bassin versant représentatif de Bourville (cases bleues du Tableau 3) (RICHET et OUVRY, 2010).

Les débits de pointe instantanés des périodes de retour jusqu'à 20 ans ont été déterminés pour ce bassin versant par un ajustement exponentiel des débits de pointe des 18 crues les plus importantes entre 1995 et 2008, (2 premières colonnes du Tableau 3). À partir de ces données locales, et en restant sur une occupation du sol et un climat similaires, on peut estimer les débits de même fréquence pour d'autres surfaces sur la base d'une formule dérivée de la méthode Crupedix.

$$Q_{fx}^{bvInconnu} = \left(\frac{S_{bvInconnu}}{S_{bvBourville}} \right)^{0,8} \cdot Q_{fx}^{bvBourville}$$

Équation 3 avec :

- ▶ fx : période de retour x ;
- ▶ Q_{fx} : débit de pointe du bassin versant pour la période de retour x (m^3/s) ;
- ▶ S_{bv} : surface du bassin versant (ha).

▶ **Tableau 3 :**

Evaluation des débits spécifiques en Pays de Caux pour différentes périodes de retour de ruissellement, tailles de surfaces ruisselantes et longueurs de fascines ou haies. Selon que le débit est inférieur, inclus, ou supérieur à la gamme des débits testés, la couleur de fond de la cellule est respectivement en jaune, bleu ou orange

Nous avons choisi des surfaces de bassin versant de 2 ha, 5 ha, 10 ha, 25 ha et 50 ha. Puis, pour estimer un débit spécifique, nous avons pris trois talwegs de largeur différente : 20 m, 40 m et 80 m, en supposant que l'aménagement, haie ou fascine, force l'écoulement à s'étaler uniformément sur toute sa largeur. Les résultats des débits spécifiques régionaux sont compilés dans le Tableau 3.

Analyse statistique des débits sur le BV de Bourville		Evaluation du Qp spécifique (l/s/ml)														
		Surface BV amont 2 ha			Surface BV amont 5 ha			Surface BV amont 10 ha			Surface BV amont 25 ha			Surface BV amont 50 ha		
		Période (année)	Qp (l/s)	Longueur fascine (m)			Longueur fascine (m)			Longueur fascine (m)			Longueur fascine (m)			
		20	40	80	20	40	80	20	40	80	20	40	80	20	40	80
0,5	899	0,3	0,1	0,1	0,6	0,3	0,2	1,0	0,5	0,3	2,2	1,1	0,5	3,8	1,9	0,9
1	2043	0,7	0,3	0,2	1,4	0,7	0,3	2,4	1,2	0,6	4,9	2,5	1,2	8,6	4,3	2,2
2	3188	1,0	0,5	0,3	2,1	1,1	0,5	3,7	1,9	0,9	7,7	3,9	1,9	13,4	6,7	3,4
5	4700	1,5	0,8	0,4	3,1	1,6	0,8	5,5	2,7	1,4	11,4	5,7	2,8	19,8	9,9	5,0
10	5844	1,9	0,9	0,5	3,9	2,0	1,0	6,8	3,4	1,7	14,2	7,1	3,5	24,6	12,3	6,2
20	6988	2,2	1,1	0,6	4,7	2,3	1,2	8,1	4,1	2,0	16,9	8,5	4,2	29,5	14,7	7,4

1.5 - Protocole utilisé pour les essais de sédimentation

Les matériaux utilisés pour réaliser ces essais, sont issus de prélèvements effectués sur quatre sols de la région (notés Sol 1, Sol 1bis, Sol 2 et Sol 3). Les prélèvements ont été réalisés dans l'horizon labouré (10 à 30 cm), les matériaux sont donc caractéristiques de ce qui est habituellement entraîné par l'érosion. Ce sont tous des sols de limons moyens sableux.

Ces matériaux ont été tamisés selon différentes granulométries puis séchés à 105° C. Trois granulométries ont été préparées pour les différents essais :

- ▶ Une granulométrie inférieure à 1 mm ;
- ▶ Une granulométrie inférieure à 2 mm ;
- ▶ Une granulométrie comprise entre 1 et 2 mm.

Le Tableau 4 récapitule les matériaux utilisés pour chacun des essais.

	Granulométrie < 1 mm	Granulométrie < 2 mm	Granulométrie comprise entre 1 et 2 mm
Sol 1	ALBL-sol 1-tamisage < 1 mm SGN-sol 1-tamisage < 1 mm TLC-sol 1-tamisage < 1 mm	ALBL-sol 1-tamisage < 2 mm	ALBL-sol 1-tamisage 1 à 2 mm SGN-sol 1-tamisage 1 à 2 mm TLC-sol 1-tamisage 1 à 2 mm
Sol 1bis	ETLE-sol 1bis-tamisage < 1 mm		
Sol 2		CB-sol 2-tamisage < 2 mm	
Sol 3		YVC-sol 3-tamisage < 2 mm	

▶ **Tableau 4 :**

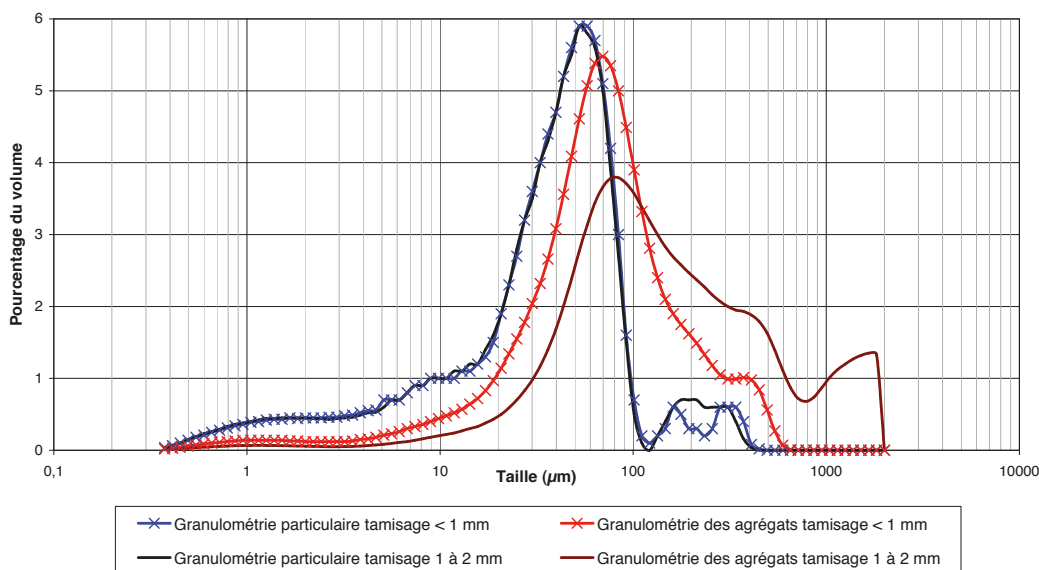
Dénomination des essais de sédimentation (les noms des sites sont abrégés par leurs initiales voir détails dans les Tableaux 5 et 6)

L'ensemble des caractéristiques de granulométrie par essai est détaillé dans l'Annexe 2.

Une double caractérisation des particules a été réalisée par des analyses au compteur coulter¹. Deux protocoles différents ont été appliqués aux échantillons :

- ▶ Pour approcher la granulométrie des agrégats tels qu'ils ont transité lors des expériences, l'échantillon de matériau source tamisé et séché a été passé directement dans le compteur coulter, sans aucun traitement préalable, et en réduisant au maximum les réglages d'agitation et la vitesse de pompe de l'appareil.
- ▶ Pour obtenir la granulométrie des particules élémentaires de sol composant l'échantillon, il a été traité préalablement à son passage dans le compteur coulter. Ce traitement est conforme à la norme NF X 31-107.

La Figure 7 montre les résultats de ces deux analyses pour le sol 1 utilisé sur l'essai conduit à Anglesqueville-la-Bras-Long (ALBL) pour une granulométrie < 1 mm et une granulométrie comprise entre 1 et 2 mm.

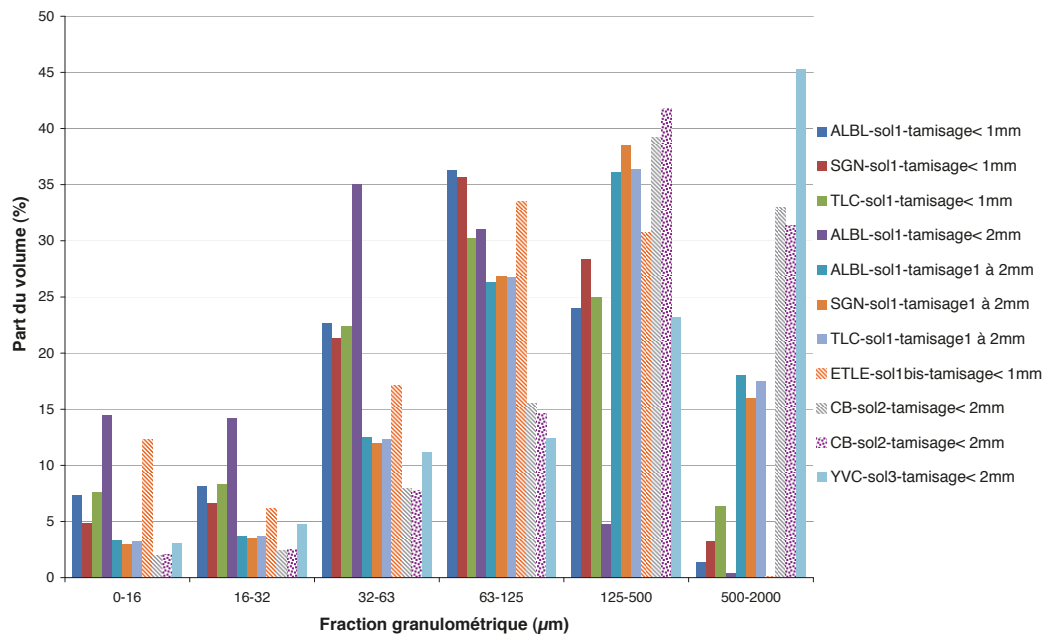


▶ **Figure 7 :**

Granulométrie particulaire et granulométrie des agrégats du matériau source issu du sol 1 tamisé à 1 mm, et tamisé entre 1 et 2 mm (Anglesqueville-la-Bras-Long)

¹ Appareil qui compte le nombre de particules en suspension dans un liquide et en mesure la taille.

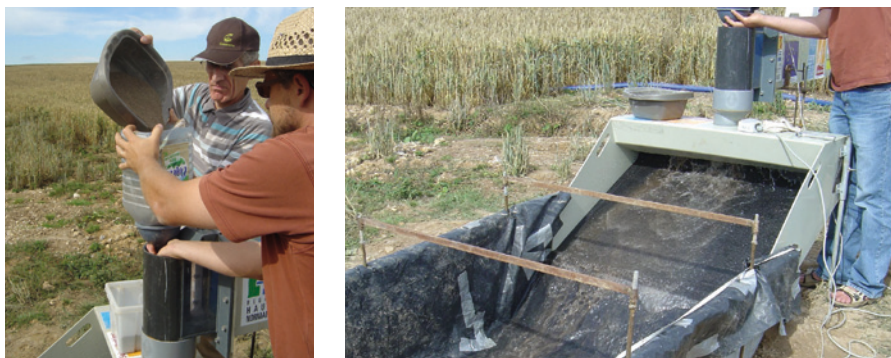
La Figure 8 présente les granulométries d'agrégats des différents matériaux sources utilisés lors des essais. On constate que ces granulométries sont très similaires pour un même sol, quel que soit le tamisage. Dans les 4 essais avec le matériau tamisé à 1 mm (agrégats), le taux de particules grossières (> 125 µm) est de 30 %. Dans les 3 essais où seuls les agrégats de taille comprise entre 1 et 2 mm sont sélectionnés, le taux de particules grossières est de 54 %. On observe une nette différence entre les granulométries apparentes des trois matériaux sources pour le tamisage utilisé : avec un tamisage à 2 mm, le sol 2 dispose d'un taux de 72 % en particules et agrégats grossiers (> 125 µm), et le sol 3 dispose d'un taux de 68 %.



► **Figure 8 :**
Granulométrie des agrégats des différents matériaux sources

Ces granulométries de matériaux utilisés sont concordantes avec celles mesurées par LECOMTE *et al.* (2001) et par LEGUEDOIS (2003) avec les mêmes types de sols régionaux.

A chaque expérience, ces sédiments sont envoyés pendant une à deux minutes, à débit solide constant, dans un flot à régime permanent, on parle d'un pulse de sédiments. L'homogénéisation des sédiments dans l'eau est assurée par le vortex, créé par la pièce fixée au bout du canal, et le tapis rugueux du plan incliné amenant l'eau jusqu'à la placette d'essai (Figure 9).



► **Figure 9 :**
Apport des sédiments et homogénéisation dans le flux
Photos ARAA

Les paramètres suivis sont : les débits en entrée et en sortie, les lignes d'eau, les concentrations de sédiments en entrée et en sortie, les granulométries apparentes et particulières des sédiments injectés et celles des sédiments déposés. Un schéma des dépôts au sein du canal en fin de chaque essai a été réalisé.

Sur chaque site, une série de deux à trois essais a été menée. Dans chacune de ces séries, les paramètres explorés ont été :

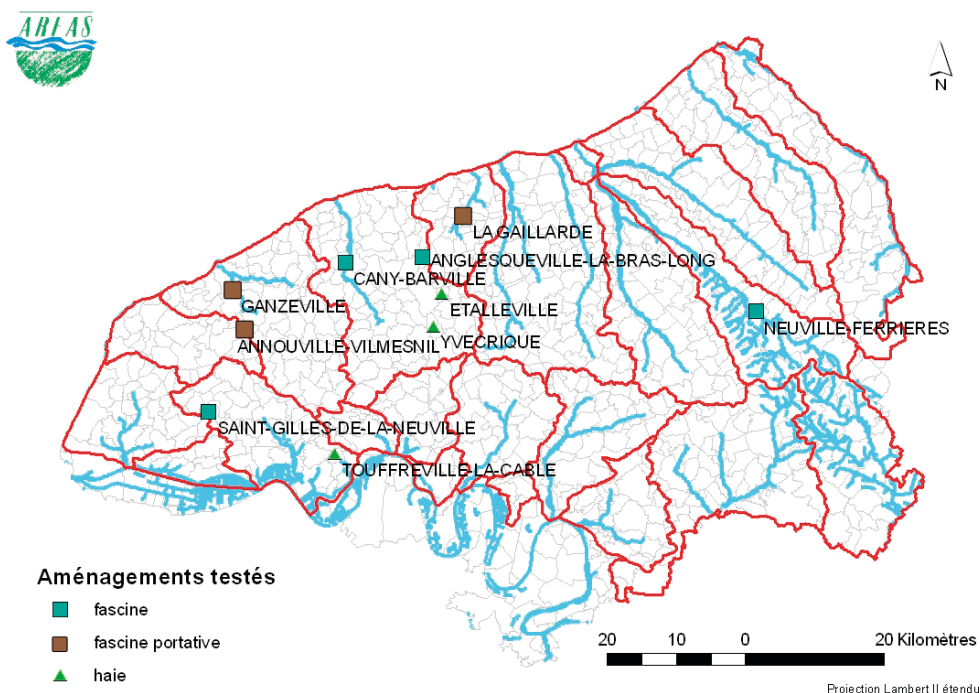
- ▶ la concentration injectée, dans la gamme 7 g/l – 28 g/l ;
- ▶ le débit spécifique d'entrée, dans la gamme 1,9 l/s/ml – 6,2 l/s/ml ;
- ▶ la granulométrie apparente des sédiments injectés.

Le choix des concentrations correspond aux moyennes des valeurs citées par CERDAN (2001) à partir d'un recensement de 674 données mesurées sur la région du Pays de Caux, issues pour partie des travaux de LE BISSONNAIS *et al.* (1998) et de LECOMTE (1999), et cohérentes avec celles observées dans les autres régions limoneuses de grande culture du nord de l'Europe par GOVERS (1985, 1991) et VAN DIJK (2001).

1.6 - Description des sites testés

Les essais ont porté sur quatre fascines et trois haies en place, et à trois reprises nous avons utilisé des fascines construites dans un cadre rigide, permettant de les transporter, qui seront qualifiées par la suite de "fascines portables"¹.

La Figure 10 localise l'ensemble des essais. Les sites et les objets testés ont été choisis de façon à être représentatifs de la diversité des aménagements rencontrés en Haute-Normandie. Les Tableaux 5 et 6 donnent les principales caractéristiques des 10 haies et fascines testées.



▶ **Figure 10 :**
Localisation des essais en Seine-Maritime

Afin de définir l'amplitude de l'efficacité potentielle de ces aménagements sur la réduction des vitesses, ce sont des fascines et des haies de densité et d'âge différents qui ont été retenues. Les haies choisies présentent des valeurs élevées de densité de tiges par m², soit du fait de l'âge (plusieurs décennies), soit du fait de leur conception : haies à vocation explicitement hydraulique.

¹ Les fascines portables ont gracieusement été réalisées par les entreprises N.E.T et Thélou Paysage.

► **Tableau 5 :**
Caractéristiques des fascines testées

Site	Neuville-Ferrières	Saint-Gilles-de-la-Neuville	Anglesqueville-la-Bras-Long	Cany-Barville	Annouville-Vilmesnil	Ganzeville	La Gaillarde
Général							
Code	NF	SGLN	ALBL	CB	AV	GANZ	LG
Photo							
Type de fascine	In situ	In situ	In situ	In situ	Portable	Portable	Portable
Date de réalisation	2008	2008-03	2007	2010-02	2009-07		2011-05
Localisation	Coin de parcelle à proximité d'une haie arbustive	Limite entre 2 parcelles cultivées	Limite entre 2 parcelles cultivées	Limite entre une parcelle et un chemin	Installation sur un chantier de récolte de lin	Installation sur une prairie	Installation sur une bêche dans une parcelle
Type de sol	Limon moyen sableux épais sur colluvions	Limon moyen sableux épais sur colluvions	Limon moyen sableux épais sur colluvions	Limon moyen peu épais (30 cm) sur argile à silex	Limon moyen épais	Sol enherbé	Sol rendu totalement étanche
Date de l'essai	2010-05	2011-03	2011-01	2010-08	2009-09	2009-11	2011-05
Largeur du canal (m)	0,6 - 1,0	1,0	0,8 - 1,0	0,8	1,0	1,0	1,0 ; 0,5 ; 0,3
Pieux							
Matériaux	Saule frais	Acacia mort	Acacia mort	Saule frais	Chevrons		Tiges filetées
Ecartement sur une ligne (m)	0,6 - 1	1,0	0,8 - 1	0,8	0,9		0,2 ; 0,4 ; 0,9
Disposition	Face à face	En quinconce	Face à face	Face à face	Face à face		Face à face
Vitalité	Médiocre (~1/3)	Nulle	Nulle	Bonne	Nulle		Nulle
Largeur (cm)	15 - 25	40 - 45	25 - 35	30 - 35	40		24
Hauteur (cm)	55	15	40	45	35		40
Fagot							
Nature	Branches de saule provenant du saule têtard voisin	Saule - branches fines et rectilignes	Saule - branches fines et rectilignes	Saule - branches fines et rectilignes	Saule - branches fines et rectilignes		Saule - branches fines et rectilignes
Profondeur	10 cm	30 - 35 cm	> 30 cm	20 cm	0	0	0
Contact avec le sol	Passable	Bon	Bon	Bon	Passable	Passable	Bon
Vitalité	Nulle	Nulle	Excellente	Faible	Nulle		Nulle
Autres informations							
Présence de plançons	Non	Non	Oui	Oui écart. ~15cm	Non		Non
Épaisseur des dépôts en amont (cm)	0	15	0	6	0		0
Remarques	Tranchée creusée avec un godet triangulaire, d'où le manque de profondeur pour le premier fagot et le mauvais contact avec le sol	Au débit max de 12l/s/m, les branches du haut flottent	Les tiges du fond ayant poussé, elles ont écarté les branches supérieures du fagot créant des passages préférentiels	Des dépôts de sédiments et de bourgeons de saule germés sont mélangés dans le fagot	Des écoulements préférentiels entre le fagot et le sol ne sont pas exclus		Trois fascines de largeurs différentes et 2 niveaux de tassement par fascine ont été testés

► **Tableau 6 :**
Caractéristiques des trois haies testées

Site	Etalleville-Berville	Yvecrique	Touffreville-la-Câble
Code	Etle	Yvc	Tlc
Photo			
Vocation	Limite de pâture	Limite de pâture	Hydraulique
Implantation	Arbustive, à plat		
Sols	Épais sur colluvions de limons moyens sableux		
Hauteur	1,9 m	1,3 m	2 à 3 m
Age	> 60 ans	> 60 ans	7 ans
Date de l'essai	2011-05	2010-07	2011-02
Nombre total de tiges sortant du sol par ml	65	80	16
Dont nombre de tiges arbustives par ml	29	6	16
Hauteur moyenne du bourrelet de terre en pied de haie	7 cm	6 cm	8 cm
Épaisseur moyenne de litière et de fragments végétaux (mulch) en pied de haie	7 cm	7 cm	2 cm
Activité biologique au niveau du sol : macro et micro faune	Très élevée	Très élevée	Élevée
Remarques	Fuites latérales parfaitement maîtrisées		Présence de filets de protection autour des troncs

2 - Résultats

Les mesures ont été réalisées pour les 3 haies et les 6 fascines sur les surfaces naturelles. Chaque site a fait l'objet d'une série de 4 à 11 mesures de débits et de hauteurs d'eau dans le chenal amont. Ce sont au total 93 jeux de données qui ont été collectés en 12 semaines de terrain puis traités et analysés.

L'ensemble des résultats de hauteurs – vitesses et coefficient de Manning issus de ces expérimentations est placé en Annexe 1. On note que les hauteurs des lames d'eau traversant les objets testés restent comprises entre 0,01 à 0,30 m pour les fascines, et entre 0,01 à 0,11 m pour les haies, ce qui reste faible.

2.1 - Réduction des vitesses d'écoulement

Les haies et les fascines constituent des obstacles perméables aux écoulements qui provoquent une réduction des vitesses d'écoulement.

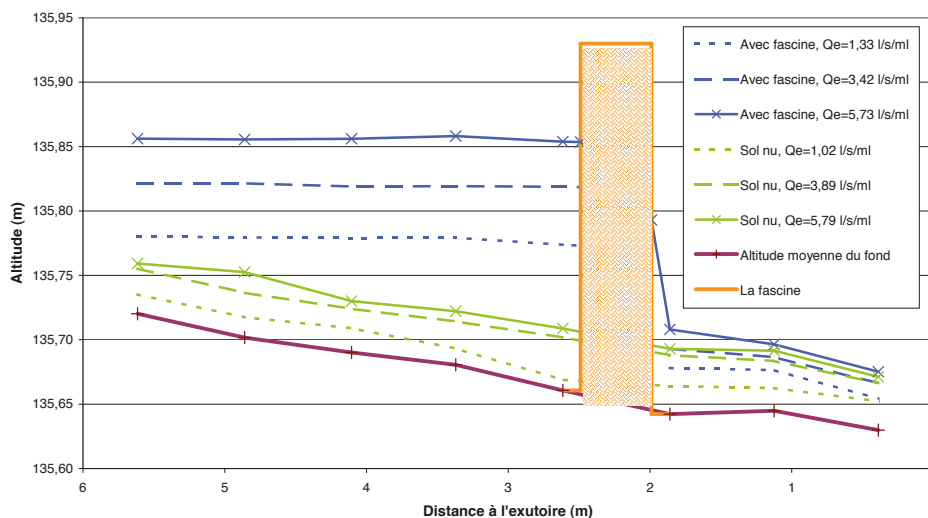


► **Figure 11 :**

Le ressaut hydraulique et la zone d'eau calme à l'amont de la haie de Touffreville-la-Câble

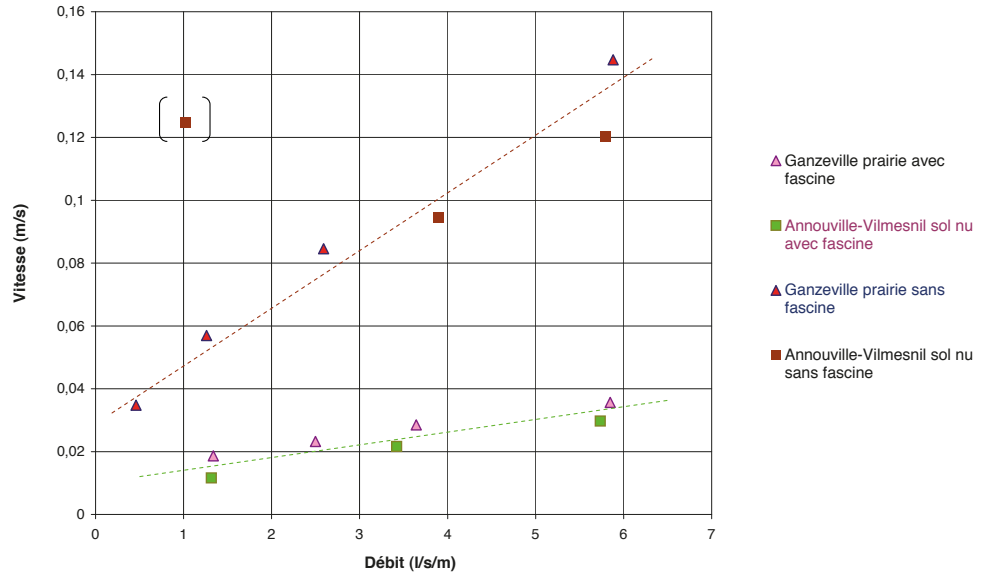
2.1.1 - Exemples de l'impact de la mise en place d'une fascine sur la hauteur de lame d'eau et la vitesse d'écoulement

Les Figures 12 et 13 et le Tableau 7 montrent l'impact de la mise en place d'une fascine en travers d'un écoulement sur sa hauteur et sa vitesse. Ceci illustre le rôle joué par la fascine : le ralentissement des écoulements.



► **Figure 12 :**

Illustration de l'évolution des hauteurs d'eau, par l'effet de frein aux écoulements, lors de l'introduction d'une fascine dans un écoulement concentré, à 3 débits différents (Annouville-Vilmesnil)



► **Figure 13 :**
 Comparaison des vitesses d'écoulement dans un chenal avec et sans fascine en fonction du débit

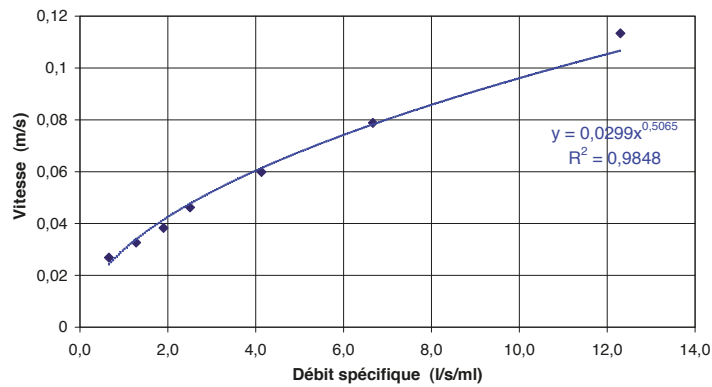
	Avec fascine	Sans fascine
Vitesse = f(débits spécifiques) gamme de validité : 1 à 6 l/s/ml	$V = 0,013 \cdot Q_s^{0,535}$	$V = 0,051 \cdot Q_s^{0,518}$
	$R^2 = 0,799$	$R^2 = 0,981$

► **Tableau 7 :**
 Effet de la présence d'une fascine sur la réduction des vitesses d'écoulement

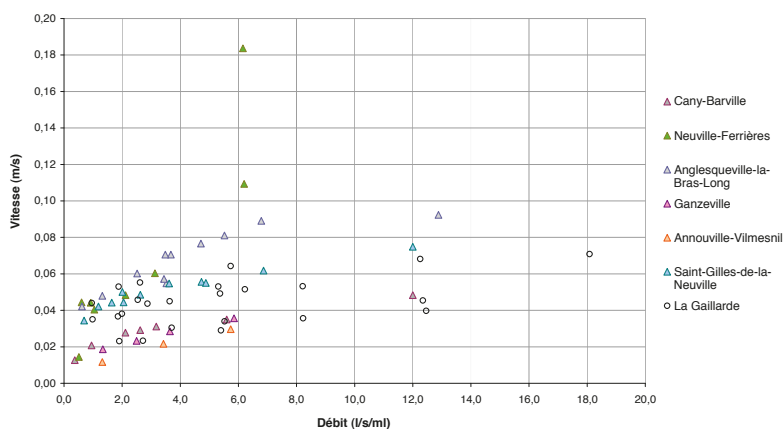
Dans la gamme des débits testés, la présence d'une fascine diminue d'un facteur 3 les vitesses. En présence d'une fascine, les vitesses sont inférieures à 4 cm/s ce qui est favorable à la sédimentation des particules.

2.1.2 - Détermination des vitesses d'écoulement juste à l'amont des dix objets testés

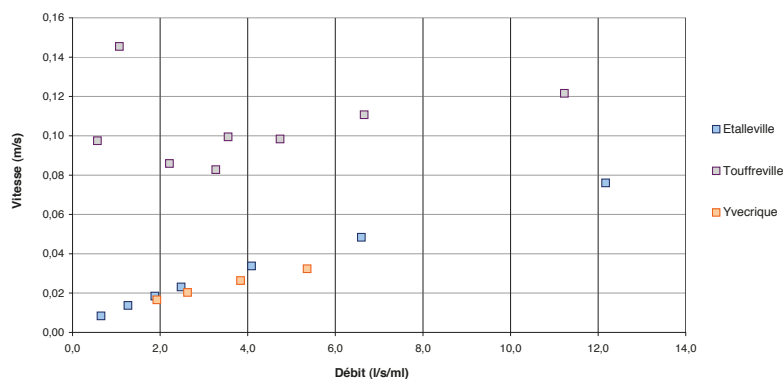
Les vitesses ont été calculées à partir du débit spécifique moyen et des sections d'écoulement (Figures 14, 15 et 16).



► **Figure 14 :**
 Résultats des mesures de vitesses d'écoulement juste à l'amont de la haie d'Etalleville en fonction du débit spécifique



► **Figure 15 :**
Résultats des mesures de vitesses d'écoulement juste à l'amont de toutes les fascines testées en fonction du débit



► **Figure 16 :**
Résultats des mesures de vitesses d'écoulement juste à l'amont de toutes les haies testées en fonction du débit

Globalement, les vitesses sont faibles, avec des valeurs généralement inférieures à 0,08 m/s pour les fascines et à 0,12 m/s pour les haies.

Trois objets font exception :

- la haie relativement jeune (7 ans) de Touffreville-la-Câble, malgré une plantation dense en arbustes (6 plants par mètre linéaire à la plantation) ;
- les 2 fascines de Neuville-Ferrières et d'Anglesqueville-la-Bras-Long pour les débits les plus élevés (> 5 l/s). A noter que ce sont aussi les 2 fascines pour lesquelles des écoulements préférentiels ont été observés.

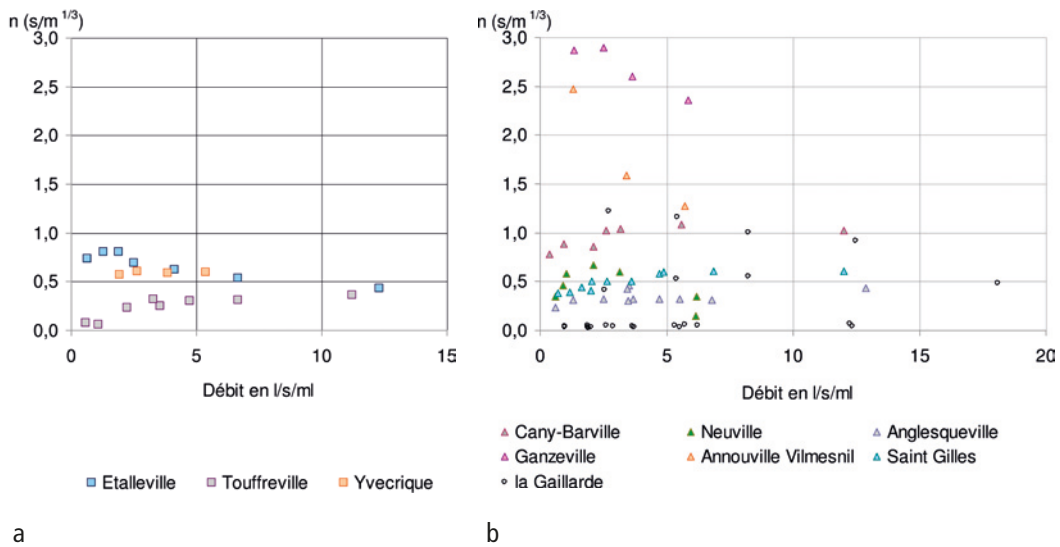
2.1.3 - Estimation des coefficients de Manning

L'utilisation de modèles d'érosion à l'échelle des bassins versants s'appuie généralement sur des équations faisant appel aux coefficients de Manning (n) pour caractériser les forces de frottement et estimer les vitesses d'écoulement (Equation 1 page 12). Aussi, ces coefficients ont été déterminés pour chaque test.

Les Figures 17 a et 17 b montrent une évolution des valeurs du coefficient de Manning à mesure que les débits augmentent. Ces valeurs semblent généralement tendre vers une valeur asymptotique pour les débits spécifiques supérieurs à 3 l/s/m. A contrario, pour les plus faibles débits, les valeurs montrent un étalement plus important des coefficients.

Pour les débits entrants inférieurs à 10 l/s/ml, la gamme des valeurs des coefficients de Manning s'étend de 0,06 s/m^{1/3} à 3,0 s/m^{1/3}. Lorsque les débits entrants sont supérieurs à 10 l/s/ml, toutes les données des coefficients de Manning convergent dans une gamme comprise entre 0,4 s/m^{1/3} et 1,0 s/m^{1/3}, ce qui correspond aux gammes de valeurs obtenues par DABNEY *et al.* (1995) avec des tests sur des haies herbacées denses.

► **Figures 17 a et 17 b :**
 Résultats des coefficients de Manning des haies (a) et des fascines (b)



2.1.4 - Analyse des résultats pour les haies

Les valeurs des coefficients de Manning sont plus élevées pour les deux haies les plus anciennes de Etalleville et de Yvecrique. On enregistre un comportement asymptotique des valeurs à mesure que le débit croît. Les observations de terrain ont montré que toutes les haies testées avaient en commun :

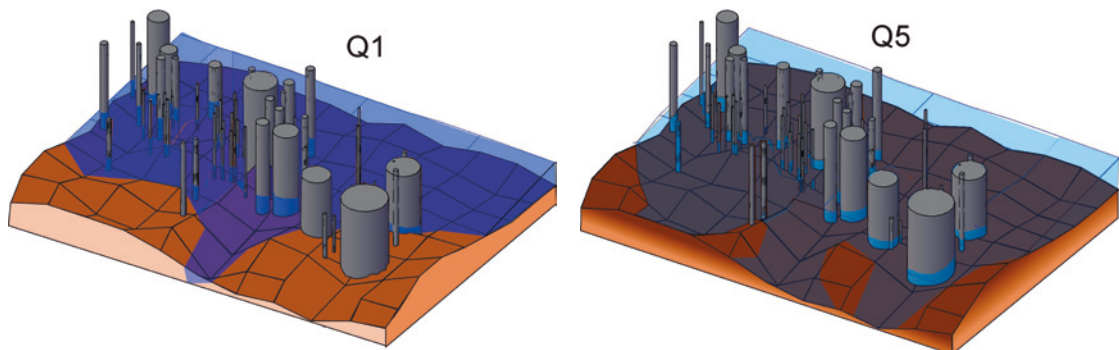
- un bourrelet ainsi qu'un mulch développé au pied de la haie, qui impactaient très fortement les écoulements (Figure 18) et les résultats pour les débits inférieurs à 5 l/s/ml ;
- une forte infiltration qui réduit d'autant les faibles débits entrant dans la haie ;
- une capacité à bloquer tous les corps flottants (pailles broyées) qui viennent renforcer la densité d'obstacles à traverser par l'écoulement.

Mais ces deux haies anciennes se distinguent par :

- une forte densité de tiges qui sortent du sol (> 50 tiges/m), due pour une part importante à la strate herbacée (orties, ronces, etc.) ;
- un mulch interne au pied de la haie important (> 6 cm) et prisonnier des diverses tiges.

► **Figure 18 :**
 Schématisation de la circulation des écoulements au travers de la haie d'Etalleville pour deux débits différents

Q1 = 0,7 l/s, Q5 = 6,6 l/s, les cylindres représentent les principales tiges, la surface brune représente le sommet du mulch, la surface bleue représente la surface de l'eau



À mesure que le débit augmente, l'effet de ces éléments particuliers intervient moins et les coefficients de frottement tendent vers des valeurs voisines de 0,4 à 0,5 s/m^{1/3}. A contrario, la haie plus jeune de Touffreville-la-Câble présente un mulch moins important et une absence de strate herbacée. Le coefficient de Manning reste faible (0,06 à 0,08 s/m^{1/3}) pour les débits inférieurs à 2 l/s/ml. Pour les débits supérieurs à 5 l/s/ml, le coefficient de Manning augmente jusqu'à la valeur de 0,35 s/m^{1/3}. Cela est à mettre en relation avec la formation d'un plaquage de paille et de foin sur les filets de protection entourant les troncs.

2.1.5 - Comparaison des résultats avec les données de la bibliographie

Les résultats de ces essais ont été comparés avec ceux de DABNEY *et al.* (1995), ainsi que ceux de FREEMAN *et al.* (2000). On constate une assez bonne correspondance des résultats obtenus pour les haies anciennes avec ceux obtenus par DABNEY *et al.* pour des haies herbacées. La gamme de valeurs des coefficients de Manning pour les débits élevés converge vers une fourchette de 0,40 à 0,80 s/m^{1/3} pour des débits spécifiques compris entre 5 et 10 l/s/ml. Pour la haie de Touffreville-la-Câble, les faibles valeurs des coefficients de Manning de 0,06 et 0,08 obtenues pour les débits spécifiques inférieurs à 2 l/s/ml correspondent aux valeurs obtenues par FREEMAN *et al.*.

A partir de ces valeurs, il est proposé de retenir les fourchettes de coefficients de Manning suivantes pour les haies avec des lames d'eau inférieures ou égales à 0,10 m, sur la base de la densité des tiges arbustives :

Densité de tiges / ml	Débit spécifique < 12 l/s/ml
> 50	0,40 < n < 0,80 (en accord avec les résultats de DABNEY <i>et al.</i>)
< 20	0,06 à 0,08 (en accord avec FREEMAN <i>et al.</i> : 0,03 à 0,08)

► **Tableau 8 :**

Gamme des coefficients de Manning (s/m^{1/3}) des haies selon la densité de tiges et le débit

Les observations de terrain peuvent toutefois laisser penser que, dans certaines conditions de transport de résidus flottants comme de la paille ou du foin, les jeunes haies puissent se transformer en obstacles nettement moins perméables et offrir ainsi un meilleur frein aux écoulements. Ces haies à plat, qui présentent une densité élevée de tiges au sol et qui ont un rôle important sur la réduction des vitesses d'écoulement, sont parfois qualifiées de « haies hydrauliques » par opposition aux « haies brise-vent », aux « haies clôtures » et aux « haies paysagères » sensu stricto.

2.1.6 - Analyse des résultats pour les fascines

Dans la gamme des débits testés, la présence d'une fascine augmente la valeur du coefficient de Manning d'un facteur 5 à 10. Les résultats des deux essais réalisés en présence et en l'absence des fascines le confirment (Tableau 9).

Coefficients de Manning moyens pour des débits spécifiques de 1,0 à 6 l/s/ml		
	avec fascine	sans fascine
Ganzeville	2,68	0,41 sur prairie
Annouville-Vilmesnil	1,78	0,16 sur sol nu

► **Tableau 9 :**

Effet de la présence d'une fascine sur le coefficient de frottement de Manning (s/m^{1/3})

Ces valeurs des coefficients de Manning sans fascine restent faibles et en cohérence avec la littérature : 0,2 à 0,4 s/m^{1/3} pour l'herbe non submergée, et de 0,2 à 0,04 s/m^{1/3} pour une herbe submergée (REE, 1949 ; MUÑOZ-CARPENA et PARSONS, 2004 ; HAAN *et al.* 1994, cités dans la brochure CORPEN sur les Zones Tampons, 2007). En cas de sol nu (compacté ou labouré) les valeurs varient entre 0,05 et 0,01.

Comme le montre la Figure 17 b, le frein hydraulique causé par les fascines présente une grande variabilité pour les faibles débits (de 0,15 à 2,9 s/m^{1/3}). En revanche, la gamme de valeurs est plus réduite pour les débits spécifiques supérieurs ou égaux à 10 l/s/ml, dans une fourchette de 0,40 à 1,0 s/m^{1/3}.

Pour expliquer une telle diversité, la qualité des fascines a été examinée. La part du volume des fagots occupée par les tiges, exprimée comme "pourcentage de plein", semble être un paramètre expliquant une part importante de cette variabilité.

2.1.6.1 - Effet de la compaction des fascines sur la densité interne

L'estimation de la densité volumique a été calculée à partir de coupe dans toutes les fascines. Une série de clichés des profils de fascines a été réalisée pour chacune d'elles (Figure 19).

Un traitement des images a permis de déterminer leur densité volumique à partir :

- du nombre de tiges par unité de surface,
- de la répartition des diamètres des tiges.

► **Figure 19 :**

Traitement d'image de fascine en coupe pour estimer sa densité volumique

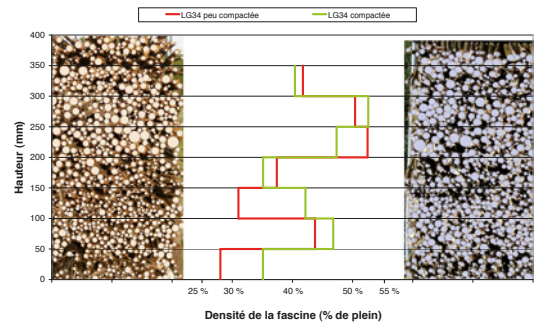
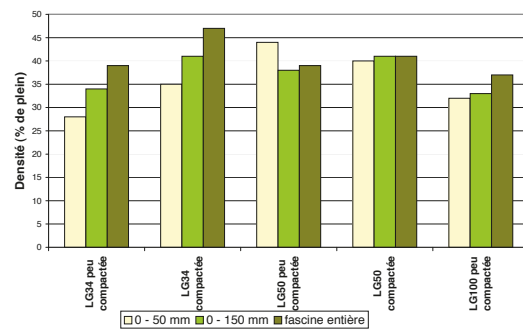


Les fascines étant hétérogènes sur la hauteur, les calculs ont été réalisés par tranche horizontale d'environ 5 cm en moyenne.

Les trois fascines amovibles de La Gaillarde ayant des longueurs de 1,0 m, 0,5 m et 0,34 m (notées respectivement LG100, LG50 et LG34) sont pourvues de tiges filetées permettant de faire varier le tassement du fagot. Les calculs de densité ont été répétés sur chaque fascine pour deux niveaux de compactage différents. La densité moyenne des fascines entières varie de 36 % à 47 % (Figure 20).

► **Figure 20 :**

Densité interne des fascines amovibles testées à la Gaillarde, valeurs moyennes sur différentes hauteurs



► **Figure 21 :**

Densité interne de la fascine portable de 0,34 m de large par tranche de 50 mm, selon l'état de compaction

Il a été observé que le compactage tend à tasser plus le dessus que le pied de la fascine. Ceci a pour effet d'avoir une perméabilité plus forte à la base qu'en haut.

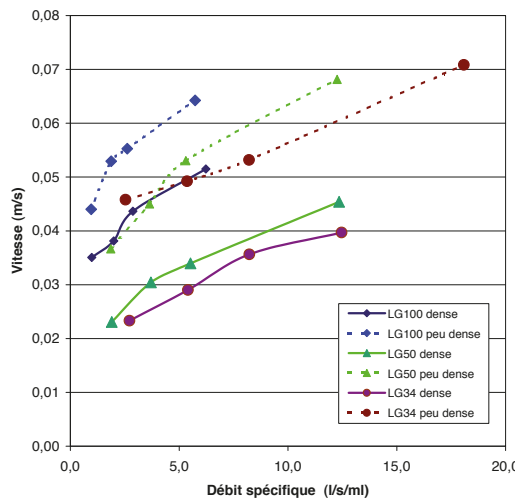
2.1.6.2 - Effet de la densité interne des fascines sur les vitesses et les coefficients de Manning

Les trois fascines amovibles de La Gaillarde de 0,25 m d'épaisseur ont été testées avec 4 débits spécifiques différents compris entre 1 à 18 l/s/ml. Les mesures ont été répétées sur chaque fascine pour deux niveaux de compactage différents. La hauteur d'écoulement est limitée à 0,35 m, hauteur au-delà de laquelle le chenal amont déborde.

L'examen des résultats sur les vitesses d'écoulement (Figure 22) indique un abattement de 20 à 49 % lorsque les fascines sont les plus denses. L'impact du degré de compaction des tiges du fagot sur les valeurs du coefficient de Manning (Figure 23) est encore plus net ; les valeurs croissent de 148 à 294 % avec l'augmentation de la densité interne.

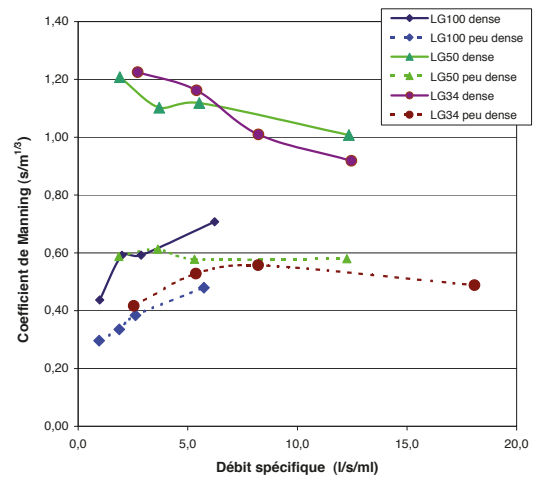
► **Figure 22 :**

Effet du degré de densité de la fascine sur les vitesses juste en amont de celle-ci (La Gaillarde)



► **Figure 23 :**

Effet du degré de densité de la fascine de La Gaillarde sur les coefficients de Manning



La densité volumique interne est donc un paramètre important dans l'efficacité des fascines à réduire les vitesses d'écoulement.

Connaissant la densité interne par tranche de 10 cm de chacune des fascines portatives de La Gaillarde (LG34, LG50, LG100) et de Ganzeville, il a été possible d'estimer les densités internes correspondant aux différentes épaisseurs de lames d'eau (Tableau 10).

Type de fascine	LG34		LG50		LG100		Ganzeville
	dense	peu dense	dense	peu dense	dense	peu dense	dense
Densité moyenne hors du sol (% de plein)	45	43	43	42	44	39	60
Débit spécifique (l/s/ml)	5,4	5,4	5,5	5,3	6,23	5,7	5,8
Hauteur d'eau (m)	0,186	0,109	0,163	0,100	0,121	0,089	0,164
Densité sur l'épaisseur d'écoulement (% de plein)	40,5	38,1	41,4	39,1	39,8	32,2	n. d.
Vitesse moyenne (m/s)	0,029	0,049	0,034	0,053	0,051	0,064	0,036
Coef de Manning : n (s/m ^{1/3})	1,16	0,53	1,12	0,58	0,71	0,48	2,36

► **Tableau 10 :**
Caractéristiques des fascines pour les débits spécifiques compris entre 5,3 et 6,3 l/s/ml

Il apparaît qu'en-dessous d'un seuil de densité de l'ordre de 40 %, la vitesse moyenne augmente et le coefficient de Manning diminue, synonyme d'une efficacité plus faible. Au-delà de 40 %, l'efficacité est caractérisée par un coefficient de Manning supérieur à 1,0 s/m^{1/3}.

2.1.6.3 - Comparaison des résultats avec les données bibliographiques

Les valeurs du coefficient de frottement de Manning obtenues pour les fascines sont proches de la valeur mesurée par MATHEJA et STOSCHEK (1998) qui est égale à 0,8 s/m^{1/3}. De même, la comparaison des résultats avec ceux obtenus par DABNEY *et al.* (1995) montre une cohérence satisfaisante puisque les valeurs se situent dans la même gamme.

2.1.6.4 - Analyse des résultats pour les fascines in situ

La densité des quatre fascines testées sur le terrain à Cany-Barville, Neuville-Ferrières, Anglesqueville-la-Bras-Long et Saint-Gilles-de-la-Neuville a été calculée (Tableau 11) et mise en regard des coefficients de Manning obtenus. On constate que ce coefficient est très fortement influencé par des effets secondaires qui viennent modifier la porosité interne du fagot, comme par exemple un remplissage des vides par des dépôts de terre (Cany-Barville), ou par des tiges de saule qui poussent au milieu du fagot et le dégradent (Anglesqueville).

Site	Cany-Barville	Saint-Gilles-de-la-Neuville	Neuville-Ferrières	Anglesqueville-la-Bras-Long
Age	Récente	Ancienne	Récente	Ancienne
Densité moyenne de tiges sur toute la hauteur	Faible	Faible	Très faible	Normale
	32 %	36 %	Non mesurée	40 %
Etat du fagot	Sain, mais rempli de dépôts de terre	Sain, avec un peu de remplissage à la base	Sain	Fagot en décomposition
Coefficient de Manning (s/m ^{1/3}) pour des débits spécifiques de 3 à 6 l/s/ml	1,0	0,55	0,3	0,3

► **Tableau 11 :**
Densités internes et coefficients de Manning des fascines testées in situ

2.1.7 - Vérification des coefficients de Manning expérimentaux par modélisation hydraulique

Le recours à un modèle hydraulique a permis de valider les coefficients de Manning déterminés à partir des relevés de terrain. Cette vérification a été effectuée par l'intermédiaire du calcul des hauteurs de lame ruisselée avec un modèle hydraulique. Le logiciel storm water management model (SWMM) de l'US Environmental Protection Agency (EPA) a été utilisé. Une modélisation a été effectuée pour vérifier les coefficients de Manning, calculés pour les 2 sites expérimentaux de La Gaillarde (fascine) et Etalleville (haie). Dans les 2 cas, avec des débits et des coefficients de Manning proches de ceux issus des expérimentations, la modélisation génère des hauteurs de lames ruisselées identiques aux expérimentations (Tableau 12).

► **Tableau 12 :**

Comparaison des résultats de hauteur d'eau en fonction des coefficients de Manning entre les données modélisées et les données expérimentales pour les sites de La Gaillarde et d'Etalleville

	Données expérimentales			Données modélisées		
	Débits injectés dans le simulateur de ruissellement (l/s)	Coefficient de Manning (s/m ^{1/3})	Hauteur de la ligne d'eau à l'amont de l'objet (cm)	Débits modélisés (l/s)	Coefficient de Manning (s/m ^{1/3})	Hauteur de la ligne d'eau à l'amont de l'objet (cm)
Fascine La Gaillarde	0,98	0,44	2,8	1	0,44	3
	2,00	0,59	5,2	2	0,59	6
	2,87	0,59	6,6	2,99	0,59	7
	6,23	0,71	12,1	5,99	0,71	11
Haie Etalleville	1,334	0,49	3,0	1,340	0,49	3,7
	2,694	0,55	4,9	3,05	0,55	5,7
	6,647	0,54	8,5	5,97	0,54	8,7
	12,325	0,43	11,0	12,32	0,43	10,7

2.1.8 - Bilan sur le ralentissement dynamique

Dans la plage des débits spécifiques testés (inférieurs à 18 l/s/ml), le Tableau 13 ci-après résume les différents degrés d'efficacité vis-à-vis du ralentissement dynamique créé par les haies et fascines en relation avec la gamme des valeurs du coefficient de Manning et leurs principales caractéristiques.

	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	$0,3 \leq n < 0,5$	$n = 0,4$	30 à 40 %	Fagot mal compacté ou détérioré (décomposition ± courts circuits)
	Forte	$0,5 \leq n < 1,0$	$n = 0,8$	40 à 45 %	Fagot bien compacté
	Très forte	$1,0 \leq n < 3$	$n = 1,2$	> 45 %	Fagot très bien compacté ou colmaté par des dépôts
Haies				Nb de tiges / ml	
	Faible	$0,06 \leq n < 0,08$	$n = 0,07$	< 20	
	Moyenne à forte	$0,4 \leq n < 0,8$	$n = 0,5$	> 50	Ou moins de 50, mais avec des débris accumulés devant les tiges (pailles, ...)

► **Tableau 13 :**

Degré d'efficacité des haies et fascines en relation avec la gamme des valeurs du coefficient de Manning et leurs principales caractéristiques

2.2 - Réduction du transport solide : sédimentation

Dans la thématique de la réduction des ruissellements et de l'érosion, le principal effet attendu de la part des haies et des fascines est le piégeage des sédiments issus des formes d'érosion linéaire.



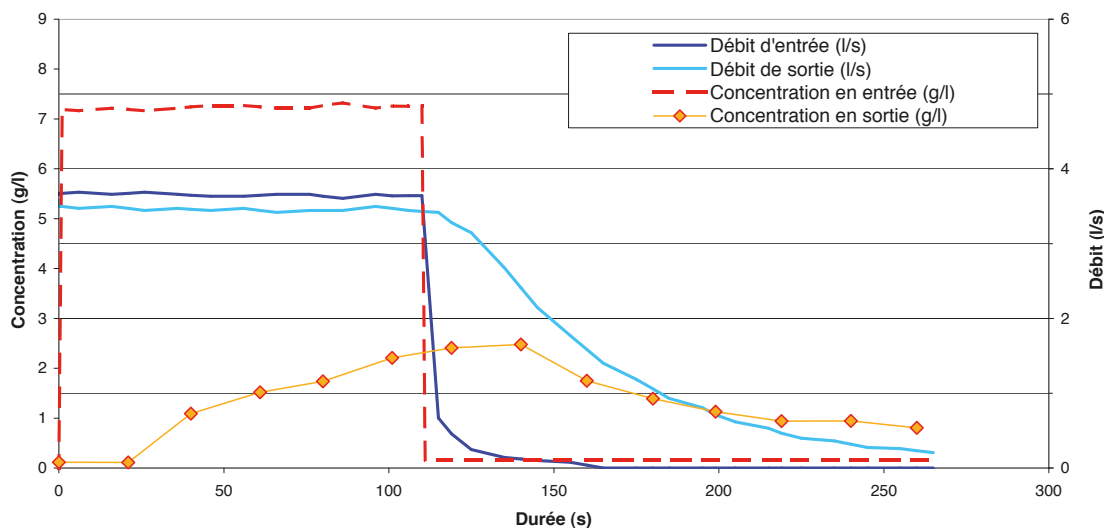
► **Figure 24 :**

Accumulation de sédiments devant une fascine située dans l'angle bas d'une parcelle et à l'exutoire de plusieurs rigoles de la parcelle versant de la Lézarde

2.2.1 - Observations spatiales et temporelles

Les mesures de sédimentation, d'exportation totale et de concentration maximale ont été réalisées sur 6 sites, trois fascines et trois haies, pour un total de 16 essais. Le tableau des résultats détaillés est placé en Annexe 2.

Pour chaque essai, les échantillons collectés à la sortie du système permettent de se rendre compte de l'évolution des concentrations dans le temps (Figure 25).



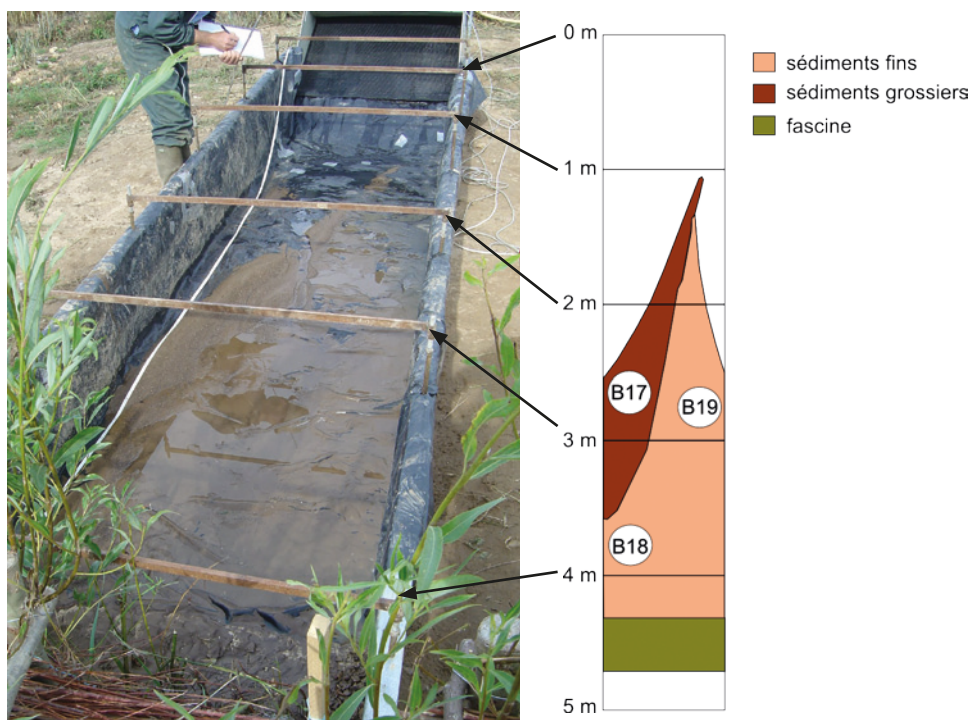
► **Figure 25 :**

Concentrations en matières en suspension (essai de Touffreville-la-Câble, tamisage inférieur à 1 mm)

L'observation des dépôts à l'issue de chaque essai (Figure 26) a donné des résultats convergents sur la répartition spatiale de la sédimentation :

- la plupart des dépôts se fait immédiatement derrière le ressaut hydraulique, c'est-à-dire dès que les vitesses chutent ;
- ces dépôts sont constitués d'agrégats visibles à l'œil nu ;
- les dépôts observés sur le reste de la zone d'eau calme sont bien plus minces, et les agrégats ne sont pas visibles à l'œil nu.

► **Figure 26 :**
Observation des dépôts
à l'issue d'un essai
(Cany-Barville, 2,6 l/s/m,
21 g/l, débit maintenu
à la fin du pulse de
sédiments)



2.2.2 - Analyse de l'effet de la granulométrie des agrégats sur le taux de transfert

Classification préalable des matériaux sources. La granulométrie réelle des terres tamisées injectées fait apparaître deux groupes distincts :

- le groupe des sols tamisés avec des caractéristiques assez fines où la proportion de particules et agrégats supérieurs à 125 µm est inférieure à 35 %. On note ce groupe F ;
- le groupe des sols tamisés avec des caractéristiques assez grossières où la proportion de particules et agrégats supérieurs à 125 µm est supérieure à 50 %. On note ce groupe G.

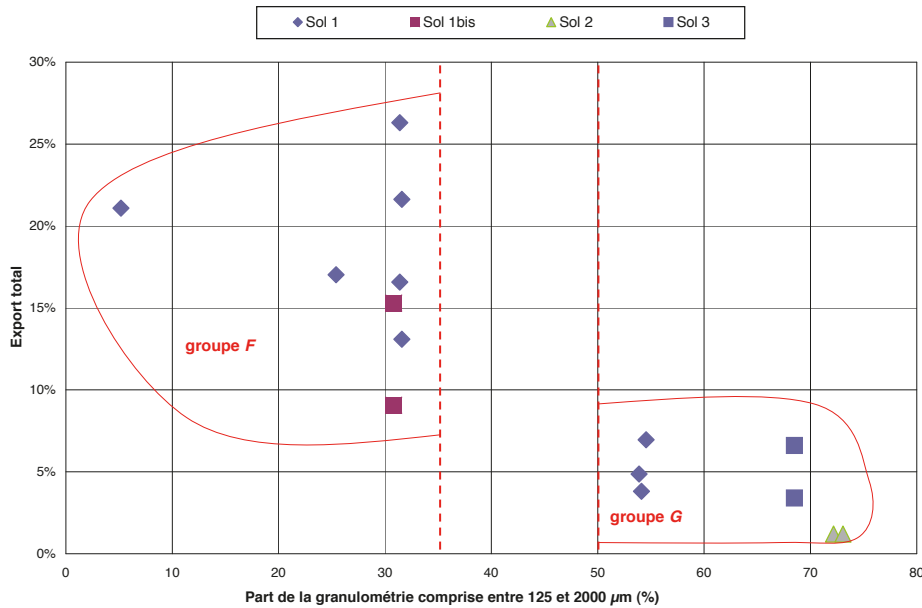
► **Tableau 14 :**
Répartition des essais
de sédimentation
dans les groupes F et G

Granulométrie issue du tamisage	< 1 mm	< 2 mm	Comprise entre 1 et 2 mm
	Groupe F		Groupe G
Sol 1	ALBL SGN TLC	ALBL	ALBL SGN TLC
Sol 1bis	ETLE		
Sol 2			CB
Sol 3			YVC

La Figure 27 illustre l'impact de la distribution granulométrique initiale sur le taux de transfert des particules à travers l'obstacle :

- le groupe F dont le taux de transfert dépasse 9 % ;
- le groupe G dont le taux de transfert est inférieur à 7 %.

La proportion des particules > 125 µm du matériau source semble bien être le paramètre essentiel expliquant l'efficacité de la sédimentation. Ceci confirme l'intérêt d'utiliser la granulométrie des agrégats pour caractériser les matériaux sources.

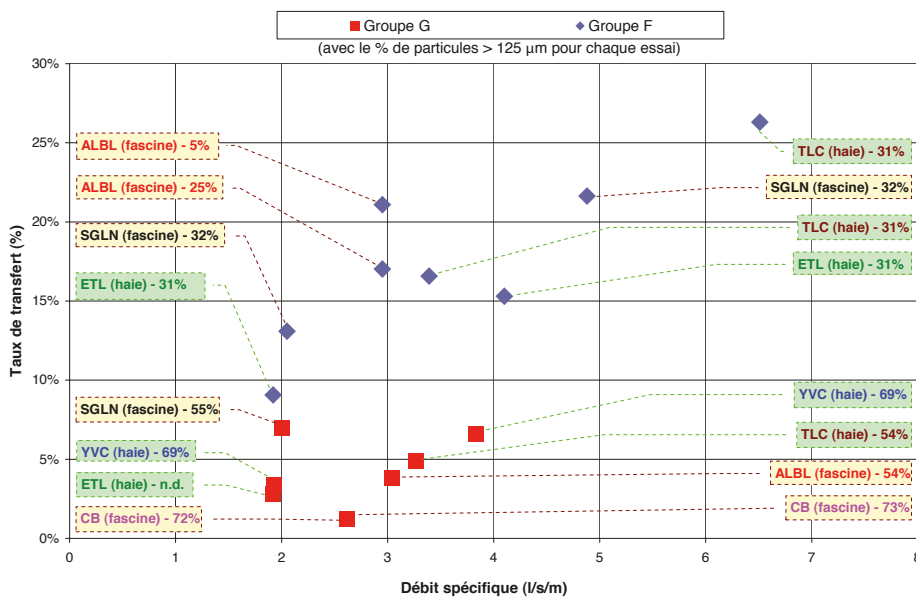


► **Figure 27 :**
Taux de transfert relatif en fonction de la granulométrie et du type de sol

Les taux de transfert des essais avec les matériaux du groupe F varient de 9 % à 26 %. Ces variations dépendent des débits, de la pente locale et de l'importance du frein hydraulique qui permet d'étendre vers l'amont la distance entre l'obstacle et le ressaut hydraulique.

2.2.3 - Analyse de l'effet du débit spécifique sur le taux de transfert

La Figure 28 présente le taux de transfert (ou export) en fonction du débit spécifique et de la granulométrie apparente du matériau source. Pour tous les essais réalisés avec les matériaux du groupe G, ces taux de transfert restent inférieurs à 10 %. Par contre avec les matériaux du groupe F, ces taux d'export croissent avec le débit spécifique.



► **Figure 28 :**
Bilan de masse relatif en fonction du débit spécifique et du tamisage initial

L'examen détaillé des résultats du groupe F révèle que l'efficacité est légèrement supérieure pour les haies, ce qui pourrait résulter de la présence de végétation herbacée et de mulch au pied des haies. On constate aussi qu'à débit identique pour un même essai, le taux de transfert augmente de 5 à 10 % lorsque l'affinement est plus poussé. De même, pour une granulométrie donnée lors d'un même essai, le taux de transfert augmente avec le débit. Ce taux de transfert est globalement proportionnel au débit spécifique, tous types d'obstacles et de sols du groupe F confondus :

$Exp_{total} = 0,030.Q_s + 0,068 \quad (R^2 = 0,71)$	Équation 4 avec :
--	-------------------

- ▶ Exp_{total} : taux de transfert (%)
- ▶ Q_s : débit spécifique (l/s/ml)

Si l'on ne retient que des matériaux homogènes du sol 1, on obtient une relation affine plus simple :

$Exp_{total} = 0,0441.Q_s \quad (R^2 = 0,74)$	Équation 5
---	------------

Par opposition au taux de transfert, le taux de sédimentation est compris entre 93 et 99 % pour le groupe G, et entre 74 et 91 % pour le groupe F. Au final, dans la gamme des débits mesurés et avec les matériaux sources utilisés qui génèrent de nombreux agrégats de taille proche de 125 µm, les meilleures efficacités de sédimentation sont obtenues pour des débits spécifiques inférieurs ou égaux à 4 l/s/ml.

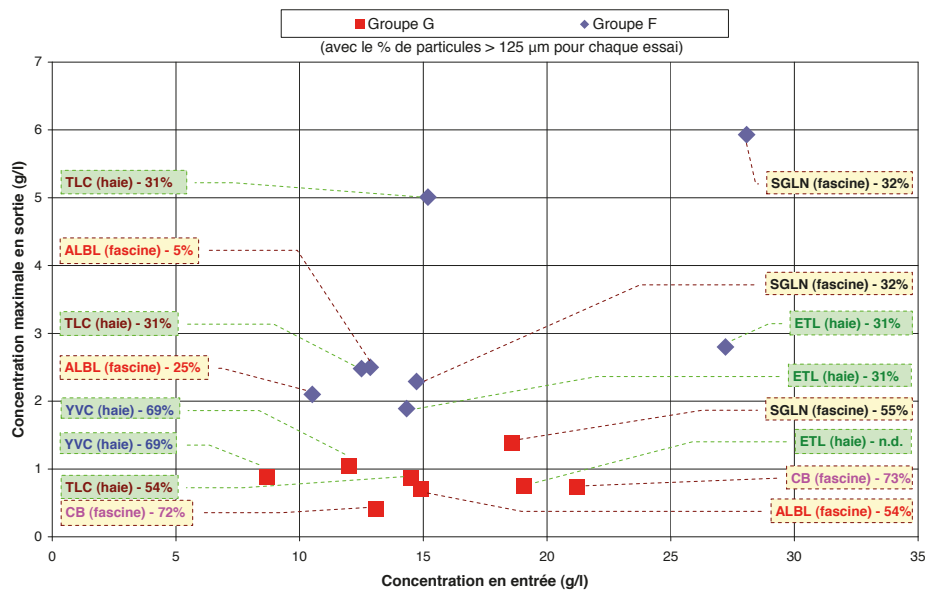
2.2.4 - Analyse des concentrations maximales en sortie

Dans la gamme des débits testés, les concentrations maximales en sortie sont restées sous le seuil de 3 g/l (Figure 29), à l'exception de l'essai avec la haie la plus jeune de Touffreville-la-Câble. Là aussi, la proportion d'agrégats supérieurs à 125 µm semble être le paramètre important pour expliquer la concentration maximale en sortie :

- ▶ pour le groupe G, la concentration maximale en sortie ne dépasse pas 1,4 g/l, quelle que soit la concentration initiale ;
- ▶ pour le groupe F, les concentrations maximales sont en majorité groupées entre 1,9 g/l et 3 g/l, seules deux concentrations maximales sont comprises entre 5 et 6 g/l.

Avec l'utilisation des sédiments plus fins du groupe F, on constate que la concentration maximale croît avec le débit spécifique.

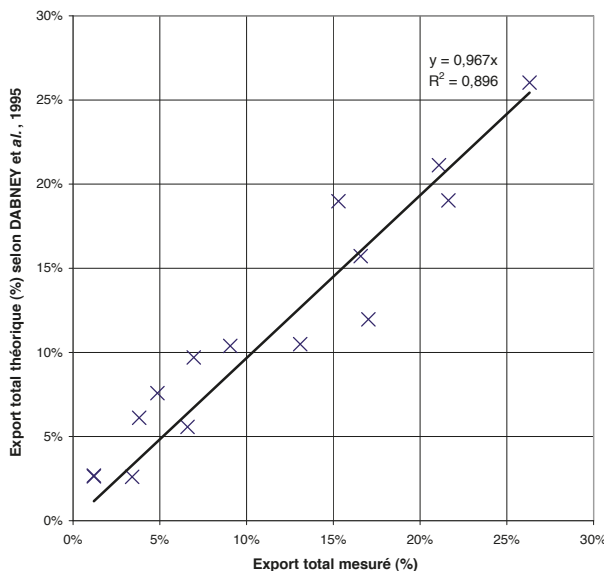
▶ **Figure 29 :**
Concentration instantanée maximale en sortie en fonction de la concentration en entrée et de la part du volume de matériau source de granulométrie supérieure à 125 µm



Lorsque l'on examine la concentration maximale en sortie par rapport à la concentration initiale, on en déduit que le taux de sédimentation est compris entre 89 et 98 % pour le groupe G et entre 47 et 90 % pour le groupe F.

2.2.5 - Confrontation des résultats obtenus avec ceux calculés à partir du formalisme de DABNEY *et al.* (1995)

Les résultats de taux de transfert totaux mesurés ont été comparés à ceux calculés avec l'équation de DABNEY *et al.* (1995) (Equation 2 page 13). Pour ce calcul, les données d'entrées utilisées sont : la granulométrie des agrégats, le débit, et la longueur du plan d'eau en amont de l'objet testé (Figure 30).



► **Figure 30 :**
Export total prédit par les équations de DABNEY *et al.* (1995), en fonction de l'export total mesuré

On obtient la régression linéaire suivante :

$\text{Exp}_{\text{total}}^{\text{théorique}} = 0,967 \cdot \text{Exp}_{\text{total}}^{\text{mesuré}} \quad (R^2 = 0,90)$	Équation 6
---	------------

Le formalisme proposé par DABNEY *et al.* (1995), destiné aux haies herbacées, semble bien rendre compte du transfert des MES devant les haies arbustives et les fascines. Il pourrait donc être possible dans une première approche d'utiliser ce formalisme. (Néanmoins, ces résultats devraient être vérifiés et confirmés.)

2.2.6 - Bilan sur la sédimentation

Globalement, l'efficacité des haies et des fascines en terme de taux de sédimentation est comprise entre 74 et 99 % sur le total des apports, et entre 47 % et 98 % si l'on se réfère aux transferts instantanés maximum. Ces différentes valeurs peuvent être affinées et schématiquement rattachées aux deux grands types de situations érosives naturelles.

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 %

► **Tableau 15 :**
Degré d'efficacité des haies et fascines sur la sédimentation en relation avec les caractéristiques des particules

2.3 - Evaluation de la fonction d'infiltration au pied des haies et des fascines

L'utilisation du simulateur de ruissellement n'a pas pour fonction première de mesurer l'infiltration à saturation dans les haies et les fascines. Néanmoins, la connaissance du débit entrant et sortant en continu, pendant toute la durée des essais, permet d'atteindre une estimation de la capacité d'infiltration sur la tranche de sol correspondant à la profondeur d'enfoncement des tôles latérales. Les essais ayant duré plusieurs heures, les horizons de surface ont été saturés. Après avoir pris un certain nombre de précautions métrologiques, il a été possible d'estimer une fourchette de capacités d'infiltration maximale à saturation des horizons de surface pour les haies et les fascines. On ne retiendra de cette partie que les ordres de grandeur de ces capacités d'infiltration.

2.3.1 - Limites de la mesure d'infiltration

Compte tenu du dispositif expérimental, les mesures d'infiltration sont réalisées sur une surface de 2,0 à 2,5 m². Selon le degré d'infiltrabilité du sol, les différences de débits à mesurer restent très faibles comme l'indique le Tableau 16.

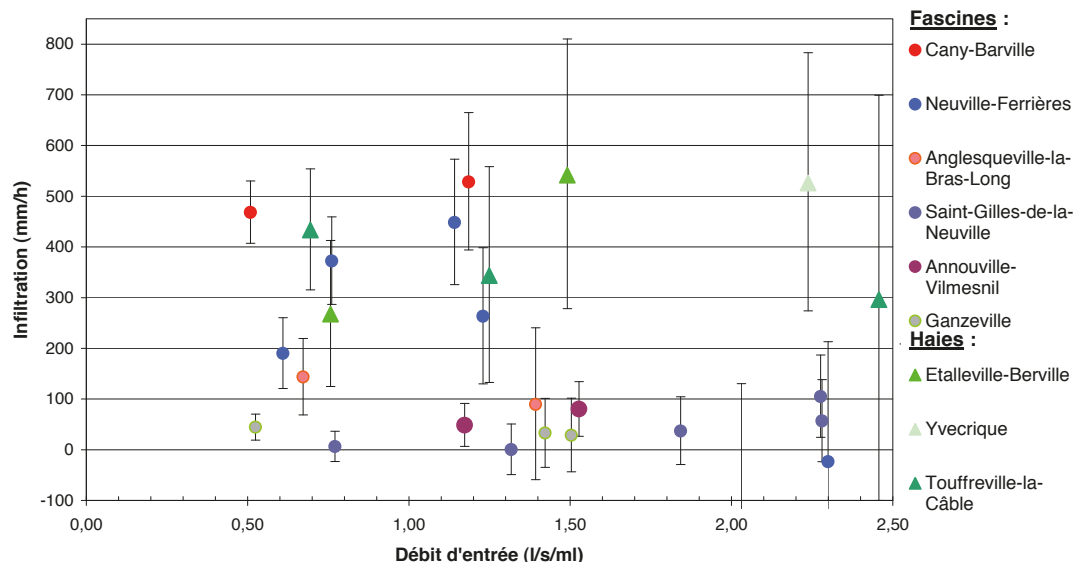
Infiltrabilité du sol (mm/h)	10	50	100	400
Différence de débits à mesurer (l/s) sur une surface de 2 m²	0,006	0,028	0,056	0,222

► **Tableau 16 :**
Différences de débits à mesurer selon le niveau d'infiltrabilité des sols

La précision des valeurs d'infiltration repose sur la précision de la mesure du débit. Aussi, pour mesurer l'infiltration par différence des débits entrant et sortant avec de si petites surfaces, (notamment lorsque les valeurs d'infiltration sont limitées < 100 mm/h), il faut rester dans les gammes de débits les plus faibles : de 0,5 à 2,0 l/s sur 1 m de large. Au-delà de ces valeurs, les incertitudes liées aux mesures des débits amont et aval sont du même ordre de grandeur que les valeurs d'infiltration. Si les valeurs d'infiltration sont plus fortes (> à 400 mm/h), alors il est possible d'élargir la gamme des débits jusqu'à 4 l/s/ml sans risque de voir les incertitudes dépasser les résultats.

2.3.2 - Résultats généraux

Les résultats des mesures pour des débits inférieurs à 2,5 l/s/ml avec les fourchettes d'incertitude sont présentés dans la Figure 31. On constate globalement que les valeurs d'infiltration au pied des fascines sont inférieures à celles mesurées au pied des haies.



► **Figure 31 :**
Valeurs d'infiltration au pied des haies et fascines en fonction du débit d'entrée (pour des débits < 2,5 l/s/ml)

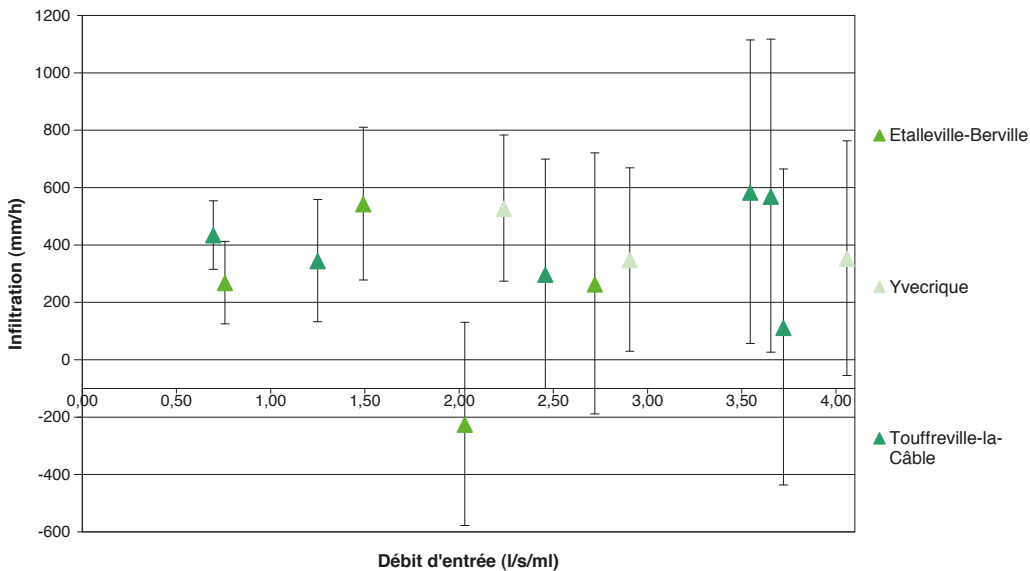
Pour les fascines, l'étalement des résultats va de 0 à 530 mm/h. Sur 16 valeurs, 9 sont comprises entre 0 et 100 mm/h (3 sites) et 7 vont de 100 à 500 mm/h (3 sites).

Parmi les 3 sites avec des valeurs faibles, on retrouve les 2 tests réalisés avec les fascines portatives installées sur un chantier de récolte et sur une prairie. Quant au 3ème site, celui de Saint-Gilles-de-la-Neuille, il s'agit d'une fascine récente. Ces résultats pourraient s'expliquer par une activité biologique plus faible en profondeur.

Les 2 sites de Cany-Barville et de Neuville-Ferrières ont obtenu des résultats élevés. On y a noté une activité biologique développée.

Pour les haies, dans la gamme des débits 0,5 – 2,5 l/s/ml, il n'y a que 4 valeurs, toutes comprises entre 260 et 540 mm/h. La valeur moyenne est de 400 mm/h.

Compte tenu des plus fortes valeurs d'infiltration, l'analyse peut être étendue sur une gamme plus large de débits : de 0 à 4,1 l/s/ml et donc aux 3 sites (Figure 32). Il y a 13 mesures, dont 12 sont comprises entre 110 et 580 mm/h, et une est négative (sans explication particulière). La moyenne des 12 valeurs est de 385 mm/h, et pour les 13 valeurs, elle n'est que de 340 mm/h. Globalement les valeurs restent du même ordre de grandeur.



► **Figure 32 :** Estimation des valeurs d'infiltration au pied des haies en fonction du débit d'entrée (pour des débits < 4,1 l/s/ml)

2.3.3 - Bilan sur l'infiltration

On retiendra l'ordre de grandeur d'infiltration suivante :

		Ordre de grandeur de l'infiltration	Surface nécessaire pour infiltrer 1 l/s
Fascines	Infiltration faible des fascines récentes ou avec peu d'activité biologique	35 mm/h (± 50 mm/h)	≈ 102 m ²
	Infiltration moyenne des fascines avec une meilleure activité biologique	360 mm/h (± 100 mm/h), soit des valeurs voisines de celles des haies.	≈ 10 m ²
Haies	Infiltration moyenne générale	400 mm/h (± 100 mm/h)	≈ 9 m ²

► **Tableau 17 :** Degré d'efficacité des haies et fascines sur l'infiltration



PARTIE 03

ENSEIGNEMENTS PRATIQUES

1 - Synthèse des points forts et points faibles des fascines et des haies pour réduire l'érosion des sols et le ruissellement	p 40
2 - Enseignements sur les conditions d'efficacité optimale pour la sédimentation	p 43
2.1 - Cas des fascines	p 43
2.1.1 - La qualité du fagot de remplissage	p 43
2.1.2 - L'absence de court circuit et une longueur suffisante de fascine	p 43
2.1.3 - La pente amont et son évolution dans le temps	p 44
2.1.4 - La taille des éléments à piéger	p 44
2.1.5 - Le débit de ruissellement	p 44
2.1 - Cas des haies	p 45
3 - Enseignements sur les localisations les plus efficaces	p 46
3.1 - Localisations pertinentes des fascines et des haies vis-à-vis des zones à risque élevé d'érosion et générant des débits limités	p 46
3.2 - Autres localisations pertinentes pour la protection rapprochée d'enjeux	p 46
4 - Bilan des utilisations pertinentes	p 48
5 - Association de haies, de fascines et d'autres zones tampons	p 48
5.1 - Association haie et fascine	p 49
5.2 - Association fascine et plançons de saule en parallèle	p 49
5.3 - Association haie ou fascine et bande enherbée	p 50
5.4 - Association fascine ou haie et bande boisée	p 50
5.5 - Association fascine, haie et bande enherbée	p 50
5.6 - Association fascine, haie et bande boisée	p 51
5.7 - Association haie ou fascine et chenal enherbé sur talweg	p 51
5.8 - A l'échelle du bassin versant, insertion d'une haie ou d'une fascine à but sédimentaire dans un aménagement linéaire à but paysager, cynégétique, énergétique ou autre	p 51
6 - Exemple d'analyse coût - bénéfique appliquée au cas d'une fascine située en aval d'une parcelle cultivée, pour protéger un lotissement des coulées de boue	p 52
6.1 - Présentation de l'étude de cas	p 52
6.1.1 - Hypothèses posées	p 52
6.1.2 - Scenarii testés	p 54
6.1.3 - Matériel et données utilisés	p 54
6.2 - Résultats techniques	p 54
6.2.1 - Méthode d'estimation des quantités de sédiments produits par l'érosion	p 54
6.2.2 - Estimation des quantités de sédiments à curer dans le lotissement avec mise en place de la fascine	p 56
6.3 - Résultats économiques	p 56
6.3.1 - Coût de curage dans le lotissement avec et sans mise en place de la fascine	p 56
6.3.2 - Coût de mise en place et d'entretien de la fascine	p 57
6.3.3 - Bilan coût - bénéfique sur la base des coûts de curage	p 57
6.3.4 - Autres scénarii possibles	p 59
6.4 - Bilan de la démarche "analyse coût - bénéfique"	p 59



PARTIE 03

Enseignements pratiques

Cette partie peut être lue indépendamment de la précédente. Elle est destinée aux techniciens qui recherchent directement des solutions pratiques. Elle rassemble les enseignements pour les fascines et les haies denses à plat à partir des résultats expérimentaux précédents, des résultats de l'enquête régionale et de l'expérience de terrain de l'AREAS.

Ces enseignements ont pour objectif de faciliter la conception de programmes d'ensemble sur les bassins versants à partir de haies, fascines, chenaux enherbés et bandes enherbées ou boisées, soit la plupart des aménagements souvent regroupés sous le vocable " zones tampons" ou "aménagements d'hydraulique douce" par opposition aux ouvrages de rétention.

1 - Synthèse des points forts et points faibles des fascines et des haies pour réduire l'érosion des sols et le ruissellement

La synthèse ci-dessous est dressée pour une gamme de débits spécifiques compris entre 1 et 10 l/s/ml, et pour les types de fascines et haies testées (Typologie Tableaux 1a, 1b, 1c pages 8 à 11 et description des sites Tableaux 5 et 6 page 22).

		Fascines	Haies
POINTS FORTS	Vitesse d'écoulement	Les fascines créent un frein opérationnel immédiat et efficace pour réduire les vitesses d'écoulement autour de 0,05 m/s. Le coefficient de Manning moyen est compris entre 0,5 et 1,0 s/m ^{1/3} .	Les haies bien développées avec une densité de tiges sortant du sol supérieure à 50 tiges/ml créent un frein efficace. Les vitesses d'écoulement varient entre 0,01 et 0,14 m/s. Le coefficient de Manning moyen est de l'ordre de 0,5 s/m ^{1/3} pour des débits spécifiques limités à 6 l/s/ml.
	Taux d'abattement de la charge solide	Avec des concentrations initiales en MES dans les ruissellements de 9 à 28 g/l, le taux d'abattement varie de 79 à 99 %, soit des taux d'exportation totale de 1 à 21 %. Les taux d'abattement les plus élevés (90 à 99 %) sont obtenus avec des agrégats et particules grossières (> 125 µm), et les taux plus faibles (77 à 90 %) avec des particules fines correspondant à un sol tamisé à 1 mm.	Les taux d'abattement varient de 74 à 97 %. Les taux d'abattement de 93 à 97 % sont obtenus avec des agrégats et particules grossières (> 125 µm), et les taux les plus faibles (74 à 91 %) avec des particules fines correspondant à un sol tamisé à 1 mm.
	Concentration en MES en sortie	Les concentrations sortant d'une fascine varient de 0,7 et 6 g/l.	En sortie de haies, les concentrations restent comprises entre 0,7 et 5 g/l.
		D'après DABNEY <i>et al.</i> (1995), le taux de sédimentation est de l'ordre de : <ul style="list-style-type: none"> ▶ 99 % des particules et agrégats de taille supérieure à 125 µm ▶ 90 à 99 % des particules de taille comprise entre 63 et 125 µm; ▶ 40 à 80 % des particules de taille inférieure à 63 µm. A mesure que les dépôts constituent un plateau sédimentaire à l'amont, la pente s'adoucit, la zone d'eau calme s'allonge, ce qui augmente l'efficacité sur la sédimentation des particules fines.	
	Infiltration	L'infiltration moyenne au pied des fascines récentes n'est que de 35 mm/h et l'activité biologique reste faible en profondeur. Avec le temps, cette infiltration moyenne croît jusqu'à 170 mm/h.	En sol limoneux profond drainant avec une activité biologique forte, la capacité d'infiltration moyenne atteint 400 mm/h (± 100 mm/h).
Emprise	Du point de vue agricole, une fascine ne demande qu'une emprise limitée au sol sur une bande de 1,0 m de large.	La haie demande une emprise limitée sur une bande de 1,0 à 3,0 m de large.	
Coût		Le coût de mise en place est de 15 à 17,5 € HT/ml pour une densité de l'ordre de 6 pieds/m ² . Après une dizaine d'années, une haie conserve toute son efficacité pendant de nombreuses années.	

		Fascines	Haies
POINTS FAIBLES	Coût	Le coût de mise en œuvre est l'un des plus élevés : de 55 à 80 € TTC/ml. Ces coûts peuvent être divisés par un facteur 3 à 5 lors de travaux en régie. Après quelques années, des coûts d'entretien pour recharger les fascines sont aussi à prévoir.	Les 2 ou 3 premières années, il faut prévoir un coût pour les tailles de formation de 15 € HT/ml/ opération. Ensuite, il peut être nécessaire de prévoir des tailles d'entretien.
	Durée dans le temps	La durabilité des tiges dans le fagot est très limitée. Après 5 à 7 ans, le fagot a presque entièrement disparu. Par ailleurs, dans les secteurs très érosifs, les observations démontrent que la sédimentation peut combler en 1 an tout l'amont de certaines fascines. Il convient donc de bien diagnostiquer ces secteurs et de prévoir au départ une possibilité de rehausser ces fascines. En l'absence de remplissage régulier, il peut être nécessaire de refaire la fascine en totalité, ce qui engendre des coûts significatifs.	L'efficacité des haies sur la sédimentation demande d'atteindre une densité élevée de tiges par ml, ce qui peut nécessiter une dizaine d'années.
	Sédimentation		Les résultats sur la sédimentation sont légèrement inférieurs à ceux obtenus avec les fascines dans la gamme des débits spécifiques testés. Tous les résultats de vitesse et de sédimentation ont été obtenus avec de faibles hauteurs de lame d'eau. Au-delà de ces gammes de hauteurs, les résultats ne sont plus applicables sans vérification et correction.
ATOUT PRINCIPAL		Le principal intérêt des fascines repose sur leur capacité à piéger les MES dès leur mise en place et notamment les éléments les plus grossiers.	Les principaux intérêts des haies reposent sur leur niveau d'infiltration et leur capacité prolongée à piéger les MES après une longue phase de développement.

► **Tableau 18 :**

Synthèse des points forts et points faibles des haies et fascines pour réduire l'érosion des sols et le ruissellement

2 - Enseignements sur les conditions d'efficacité optimale pour la sédimentation

2.1 - Cas des fascines

L'efficacité vis-à-vis de la sédimentation des particules repose sur les 5 principaux facteurs que sont : la qualité du fagot de remplissage, l'absence de court circuit, la pente amont du terrain, la taille des particules à piéger et le débit de ruissellement.

2.1.1 - La qualité du fagot de remplissage

L'efficacité globale de la fascine est directement proportionnelle à la densité de tiges qui doit être supérieure à 40 % et si possible à plus de 50 %. Pour cela, il faut veiller à :

- ▶ *compacter le fagot uniformément sur toute la hauteur de la fascine, sachant que l'année qui suit la réalisation, le fagot se dessèche et une décompression s'opère entre les tiges, notamment vers le haut de la fascine ;*
- ▶ *s'assurer de l'homogénéité du remplissage, en ayant une distribution régulière et homogène des tiges rectilignes de section relativement petite de 2 à 3 cm de diamètre ;*
- ▶ *pendant les 10 premières années, il faudra prévoir, à une ou deux reprises, de recharger le fagot de la fascine. Cela peut se faire avec des branches issues de la taille d'une haie ou des pieux vivants d'une fascine.*



▶ **Figure 33 :**

L'homogénéité du remplissage et la compaction du fagot assurent l'efficacité optimale de la fascine

2.1.2 - L'absence de court circuit et une longueur suffisante de fascine

L'efficacité est très influencée par la présence de court circuit : fascine trop courte, activité naturelle de la faune difficile à éviter, reprise de branches au cœur du fagot, etc... (Figures 34 et 35)



▶ **Figure 34 :**

Galerie de lapin creusée sous une fascine, court circuit potentiel lié à une fascine mal enterrée

▶ **Figure 35 :**

fascine trop courte, une partie du ruissellement passe à côté

Afin de dimensionner de façon optimale une fascine ou une haie, il est possible de consulter la note pratique éditée par l'AREAS en Annexe 3.

2.1.3 - La pente amont et son évolution dans le temps

La quantité de particules qui sédimentent est proportionnelle à la longueur de la zone d'eau calme en amont de la fascine, donc à la pente du terrain.

Au fil du temps, les dépôts s'accumulent sur la plage sédimentaire en amont de la fascine, ce qui diminue la pente, augmente la longueur de la zone d'eau calme et renforce l'efficacité de la fascine (Figure 36). La théorie développée par DABNEY *et al.* (1995), suggère qu'une zone sédimentaire d'une dizaine de mètres de largeur permettrait d'améliorer considérablement l'efficacité des fascines dans la gamme des débits spécifiques inférieurs à 10 l/s/ml. Le taux de piégeage des MES peut dépasser systématiquement 90 % dans ces conditions.

Ainsi, si l'on envisage le curage d'une fascine, on aura intérêt à conserver la partie inférieure des dépôts qui forme une plage quasi horizontale de 10 m de large en amont des fascines. Mais, afin de conserver la hauteur fonctionnelle de 0,50 m, il est indispensable de pouvoir la rehausser d'autant, voire de la rallonger sur les côtés si nécessaire. Pour pouvoir rehausser la fascine, la solution consiste à prévoir dès l'implantation, des pieux vivants de 0,8 à 1,0 m de hauteur hors du sol, et à utiliser les branches des pieux vivants pour recharger le fagot de la fascine (Figure 37).

► Figure 36 :

Les dépôts qui s'accumulent en amont de la fascine diminuent la pente, ce qui renforce son efficacité

► Figure 37 :

Une fois taillées, les branches de saule viendront compléter le fagot, de façon à rehausser la fascine, cela est possible car les pieux sont longs



2.1.4 - La taille des éléments à piéger

La théorie démontre que la sédimentation est d'autant plus importante quand les particules transportées par le courant sont de taille élevée. Dans les régions de plaines limoneuses battantes, LE BISSONNAIS *et al.* (1996) ont démontré que ces caractéristiques se rencontrent dans les écoulements les plus en amont, c'est-à-dire à proximité des talwegs ou parcelles érodées.

Par ailleurs, selon la typologie d'érosion rencontrée sur les parcelles, la granulométrie des MES est généralement plus grossière soit dans les zones d'érosion linéaire (érosion en rigoles de versant ou en ravines), soit en cas de pluie intense sur sol nu, et plus particulièrement en zone de pente où l'arrachement et le transport de particules grossières peuvent être très significatifs.

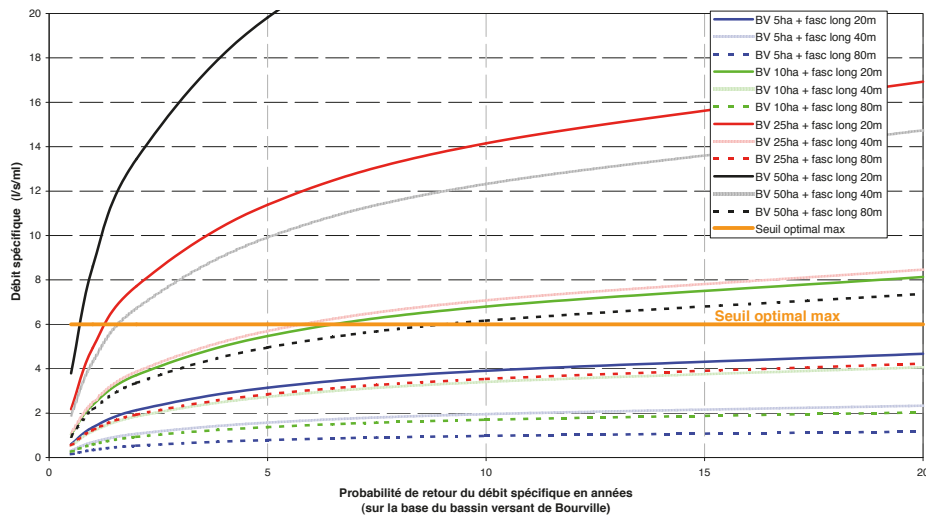
L'intérêt des fascines est donc élevé à proximité des zones d'érosion linéaire, et dans les régions soumises à des pluies intenses sur sol nu ou peu couvert : taux de couverture inférieur à 20 % (CERDAN, 2001).

2.1.5 - Le débit de ruissellement

L'effet du débit, et plus particulièrement du débit spécifique, est identique à celui de la pente, puisqu'il influence directement la vitesse d'écoulement. Les fascines seront plus intéressantes face aux débits spécifiques inférieurs à 6 l/s/ml. Pour des fascines de faible longueur, cela correspond en général à des surfaces ruisselantes réduites.

Mais, dans certaines situations géomorphologiques en aval de bassin versant plus grand, les talwegs sont plats et larges et les écoulements peuvent s'étaler sur de grandes largeurs. Dans ces conditions, les débits spécifiques peuvent rester en-dessous du seuil de 6 l/s/ml, et les fascines peuvent aussi être utilisées.

A titre d'exemple, pour les territoires limoneux de type "Pays de Caux", la Figure 38 illustre les conditions d'efficacité à remplir pour rester en-dessous du seuil de 6 l/s/ml en fonction de la taille du bassin versant amont, de la longueur de fascine ou de haie et de l'objectif de probabilité de retour de débit spécifique (déduit des données du site de Bourville - Tableau 3 page 18).



► Figure 38 :

Estimation du débit spécifique par ml de fascine ou de haie (sur la base des débits mesurés sur le bassin versant de Bourville), en fonction de la probabilité de retour du débit de ruissellement, de la surface du bassin versant cultivé en sols de limons battants et de la longueur de la barrière végétale traversée par l'écoulement

2.2 - Cas des haies

L'efficacité vis-à-vis de la sédimentation des particules repose essentiellement sur la densité de tiges au sol, ainsi que sur les mêmes facteurs que pour les fascines : l'absence de court circuit, la pente amont du terrain, la taille des particules à piéger et le débit de ruissellement (se référer à la partie précédente pour ces facteurs).

En matière de densité de tiges, pour atteindre les résultats recherchés dans un délai raisonnable, il convient de conjuguer les critères suivants :

- une densité de plantation serrée, de l'ordre de 6 pieds / ml ;
- un mode d'entretien qui favorise la multiplication de nombreuses tiges au sol ou à la base : taille en cépée. La taille est une condition clé pour atteindre rapidement (10 ans environ) cet objectif de densité ;
- des variétés arbustives régionales en mélange qui produisent beaucoup de drageons ou de tiges à la base, qui supportent la taille et l'accumulation des dépôts ;
- les conditions du meilleur développement possible des plants : qualité de la préparation du sol (décompactage, humus) ; la réduction de la concurrence par un paillage naturel ou un désherbage manuel autour des plants les premières années.

Il convient également de veiller à l'étalement de l'écoulement concentré pour réduire l'épaisseur de la lame d'eau.



► Figure 39 :

L'efficacité de la haie dépend de la densité de tiges partant du sol, les espèces qui drageonnent sont à privilégier

► **Figure 40 :**
Les courts circuits
réduisent l'efficacité
de la haie vis-à-vis de
l'érosion



3 - Enseignements sur les localisations les plus efficaces

A partir de ces conditions d'efficacité, et selon les objectifs et les enjeux, il est possible de définir des localisations à privilégier. Elles sont représentées dans la Figure 41.

3.1 - Localisations pertinentes des fascines et des haies vis-à-vis des zones à risque élevé d'érosion et générant des débits limités

Les fascines et les haies situées immédiatement en aval de surfaces ruisselantes de petites dimensions et très érodables présentent le plus d'intérêt. Il s'agit par exemple des situations suivantes :

- *au pied des versants concernés par l'érosion en rigoles, c'est-à-dire en majorité ceux qui ont une pente supérieure à 5 % ;*
- *au pied des versants de pente plus faible (2 à 5 %) mais concernés par des problématiques de pluies intenses sur sol nu (ex : semis de maïs ou de betteraves) ou avec un type d'occupation du sol très ruisselant (ex : pommes de terre), et a fortiori si les parcelles sont cultivées dans le sens de la pente ;*
- *perpendiculairement aux talwegs d'ordre 1 et 2 de Strahler, ou sur des axes d'écoulements concentrés (coin de parcelle) sujets à l'érosion en ravines, c'est-à-dire en majorité ceux qui ont une pente supérieure à 1 %.*

3.2 - Autres localisations pertinentes pour la protection rapprochée d'enjeux

Les fascines peuvent faire partie des moyens à mettre en œuvre pour réduire la charge en MES des écoulements qui perturbent les zones d'habitat, les routes, les ouvrages hydrauliques, les cours d'eau et la ressource en eau (Figure 41). Ce sont des éléments de protection rapprochée situés à l'interface entre les zones d'érosion et les secteurs à enjeux.



► **Figure 41 :**

Localisations pertinentes des haies et des fascines pour réduire l'érosion des sols

- ❶ Au pied des versants de pente > 5 % qui souffrent d'érosion en rigole
- ❷ Perpendiculaire à un axe de ruissellement
- ❸ En coin de parcelle
- ❹ A l'interface entre parcelle cultivée et prairie
- ❺ En protection rapprochée d'une zone urbaine
- ❻ En protection rapprochée d'une route
- ❼ En protection rapprochée d'une bétairie (puits karstique)
- ❽ En protection rapprochée d'un ouvrage de réduction des inondations
- ❾ En renforcement d'une bande enherbée le long de la rivière
- ❿ En association avec une bande enherbée de talweg

4 - Bilan des utilisations pertinentes

L'outil "fascine" est bien adapté pour apporter une réponse immédiate aux problèmes de transfert d'agrégats, ou de particules grossières sur les zones amont des bassins versants. Il permet de piéger de 60 à 99 % des particules selon les conditions : géomorphologiques - pédologiques - agricoles - et climatiques. Pour pérenniser l'action, il convient soit de prévoir un rechargement régulier du fagot, soit de transformer la fascine en haie de saule par bouturage de plançons en complément des pieux vivants, soit de planter une haie derrière la fascine qui puisse prendre le relais.

L'outil "haie" apporte un taux d'efficacité voisin au bout de 10 ans, mais pour une durée plus longue. Compte tenu de son effet très significatif sur l'infiltration, la haie à plat présente un intérêt supplémentaire en situation perpendiculaire au versant pour intercepter des ruissellements diffus et ré-infiltrer une part des écoulements. Par ailleurs, la haie sur talus perpendiculaire au versant peut aussi être très intéressante car elle offre une efficacité immédiate, et la possibilité d'accroître la protection rapprochée de zones à enjeux en dérivant les ruissellements tout en piégeant les sédiments.

Le Tableau 19 ci-après récapitule et classe l'ensemble des situations intéressantes pour les haies en fonction des objectifs recherchés et des processus érosifs.

► **Tableau 19 :**
Qualification de l'efficacité d'une haie sur l'infiltration et sur la sédimentation selon sa localisation et le type de ruissellement intercepté

			Ordre de grandeur de l'efficacité		
Type de haie	Localisation	Ruissellement	Infiltration	Sédimentation	
Haie dense	A plat	⊥ au talweg	Concentré	+	++ à +++
Haie peu dense		// au talweg		++	0 à +
		⊥ au talweg ou au versant		# 0	# 0
		Sur talus	⊥ au versant	Diffus	+++
Indifférent	+++			+++	

Pour renforcer l'action de filtre et de réduction des transferts de polluants, et pour prolonger l'efficacité dans le temps, il peut être judicieux, voire recommandé, de combiner ces aménagements Haie + Fascine et / ou avec d'autres types de zones tampons.

5 - Association de haies, de fascines et d'autres zones tampons

Les haies et fascines peuvent être associées entre elles, mais elles trouvent aussi un grand intérêt à être conjuguées aux bandes enherbées ou aux bandes boisées créées avec d'autres objectifs. L'association peut viser à conjuguer plusieurs fonctions sur un même lieu, talweg ou coin aval de parcelle, mais elle peut rechercher une succession de fonctions étalées sur un plus grand linéaire de haie par juxtaposition de tronçons de qualités différentes. Il s'agit par exemple au sein d'une haie brise-vent ou cynégétique ou bois - énergie, située entre deux parcelles, d'insérer un tronçon de haie avec une fonction de sédimentation lorsque la haie «croise un talweg». Dans ce cas, la démarche s'inscrit dans une approche plus globale des territoires et des fonctions que l'on souhaite développer. On pourra se référer aux guides des zones tampons (CORPEN, 2007 et GRIL, 2010).

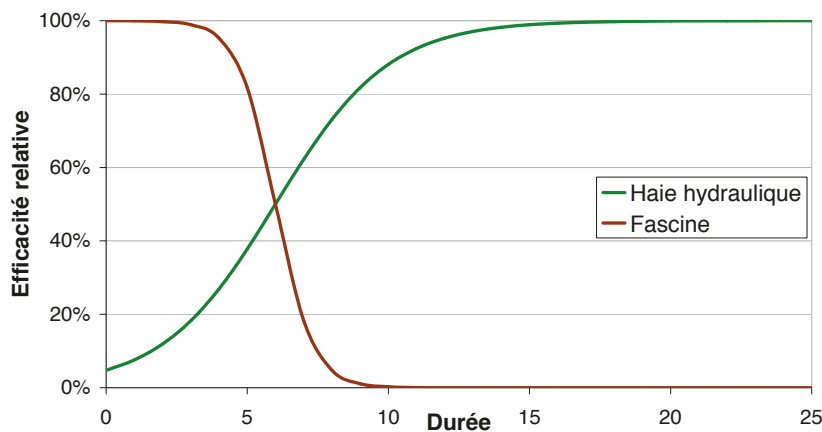
Dans ce qui suit, il sera principalement question des associations de plusieurs fonctions dans un même endroit.

5.1 - Association haie et fascine

Les caractéristiques des haies et des fascines montrent combien il peut être pertinent de les combiner tant leurs résultats sont complémentaires sur le plan de l'efficacité, pour réduire la vitesse des écoulements et abattre la charge à court et long terme. L'association d'une haie et d'une fascine permet à la fois de :

- ▶ gagner en efficacité dans le ralentissement hydraulique sur le long terme, comme l'illustre la Figure 42 ci-après ;
- ▶ faire face à des débits spécifiques plus élevés et donc d'être installée en aval de surfaces ruisselantes plus vastes ;
- ▶ de renforcer la ré-infiltration dans une moindre mesure.

Ce couple constitue donc une solution efficace et durable.

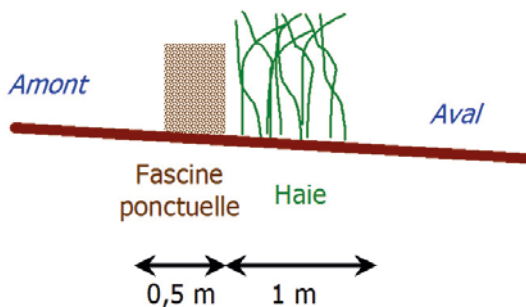


▶ **Figure 42 :**

Schéma de l'évolution temporelle comparée de l'efficacité relative sur le frein hydraulique créé par une haie et une fascine non rechargée

Aspects pratiques

Il est conseillé de réaliser la fascine à l'amont avec une densité la plus forte possible. Ce positionnement permet de protéger les jeunes plants de la haie contre les dépôts à leurs pieds et qu'ils soient submergés.



▶ **Figure 43 :**

Conception schématique d'une fascine associée à une haie et exemple de mise en œuvre

Un tel couple «Fascine + Haie dense» nécessite une emprise minimale au sol de 2 m, afin de conserver un éloignement symbolique de 0,25 m par rapport aux passages des outils de travail du sol. Mais, une emprise de 4 à 5 m est préférable en laissant environ 3 m d'herbe en aval (voir § 5.5). En matière d'entretien, cela correspond pour l'essentiel à celui de la haie. On pourra utiliser les produits de taille de la haie pour recharger les fagots de la fascine les premières années, sous réserve d'avoir prévu des arbustes susceptibles de fournir la qualité requise en type de branches pour les fagots.

Le coût initial d'une telle association reste supérieur à celui de la mise en place d'une fascine seule. Néanmoins à long terme, compte tenu des coûts de restauration, d'entretien et de l'efficacité prolongée sur des dizaines d'années, la rentabilité de cette association sera améliorée.

5.2 - Association fascine et plançons de saule en parallèle

La haie est remplacée par une série de jeunes tiges de saule (plançons de 1 an) plantées directement dans le sol en amont ou en aval contre la fascine, avec une très forte densité : tous les 2 à 5 cm (Figure 44). Le but de cette plantation est de constituer une haie dense après quelques années. Cette technique est simple et elle est utilisée en région Haute-Normandie par quelques maîtres d'ouvrage, car elle permet d'obtenir

rapidement une haie à un coût de réalisation minime. Une technique alternative consiste à utiliser les repousses issues des pieux vivants dès que leur développement le permet.

► **Figure 44 :**

Piqués contre la fascine, les plançons de saule constitueront à terme une haie dense. C'est elle qui assurera l'efficacité de l'aménagement quand le fagot aura pourri



Les observations de terrain montrent une assez bonne reprise des plançons de saule sous réserve qu'ils soient enfoncés profondément (40 à 50 cm), toujours en-dessous de la semelle de labour et à une saison propice à la reprise.

Sur le plan de la biodiversité, la question du développement de haies monospécifiques en saule doit être examinée en préalable à la généralisation de cette variante à l'échelle d'un territoire. C'est certainement une solution à réserver à des cas particuliers.

5.3 - Association haie ou fascine et bande enherbée

Les observations sur de petits bassins versants avec des occupations du sol mixtes ont montré que le positionnement d'une fascine, ou d'une haie à l'interface entre une culture à l'amont et une prairie à l'aval, était particulièrement efficace. En effet, l'obstacle constitué par la haie ou la fascine joue un double rôle de piège à sédiments grossiers (> 125 µm) et d'étalement des écoulements. En sortie de cet obstacle, les surfaces en herbe situées en aval reçoivent une faible lame d'eau par unité de largeur, ce qui permet de poursuivre le piégeage des éléments plus fins.

L'association représente une emprise de l'ordre de 5 m de large.

5.4 - Association fascine ou haie et bande boisée

Si l'on cherche à favoriser l'infiltration sur des sols présentant une forte capacité à infiltrer, il est possible de concevoir des bandes boisées en aval de la fascine ou de la haie. L'intérêt repose sur l'étalement du ruissellement provoqué par ces derniers, qui laissent passer une faible lame d'eau sur de grandes surfaces infiltrantes boisées situées en aval. Le niveau d'infiltration attendu sous bande boisée est semblable à celui obtenu dans le pied d'une haie. Pour obtenir un réel impact positif, la largeur de ce type d'association devra a minima être de 5 m.

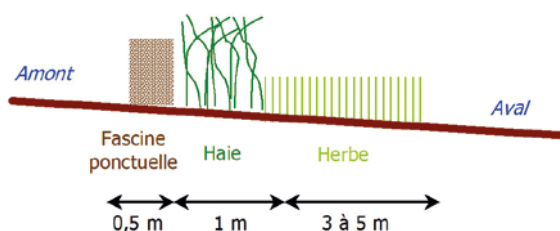
Le CORPEN (2007) propose aussi d'associer une bande boisée avec une bande enherbée dans des objectifs similaires.

5.5 - Association fascine, haie et bande enherbée

Cette combinaison à trois types d'aménagements offre les avantages d'une efficacité renforcée sur la sédimentation et sur l'infiltration, le tout sur une plus grande plage temporelle.

► **Figure 45 :**

Conception schématique d'une fascine + une haie associée à une bande enherbée et exemple de mise en œuvre



En effet, la fascine présente une efficacité immédiate sur la sédimentation des particules grossières (> 125 µm). La haie aura à moyen terme une efficacité assez proche de celle de la fascine, et sera susceptible de la remplacer. Elle apporte en plus dès son installation une efficacité certaine sur l'infiltration. En outre les branchages issus des tailles permettent de recharger directement la fascine pour allonger sa durée de vie. Et, du fait de l'étalement de la lame d'eau par la fascine et la haie, la bande enherbée continue d'améliorer la sédimentation des particules, et notamment des plus fines. De plus, elle apporte une capacité d'infiltration supplémentaire.

La localisation d'une bande enherbée en amont ne permettrait pas d'obtenir cet effet épuratoire supplémentaire.

5.6 - Association fascine, haie et bande boisée

Comme dans le cas précédent, l'ajout d'une bande boisée présente un intérêt pour renforcer l'infiltration en conservant une bonne efficacité à long terme sur la sédimentation.

5.7 - Association haie ou fascine et chenal enherbé sur talweg

Dans les situations où le ravinement sur l'axe de ruissellement concentré en amont de la haie ou de la fascine est élevé, il existe un risque important de comblement par les sédiments qui peut être rapide, parfois en un seul évènement. Il est nécessaire de bien diagnostiquer ces cas de figure pour mettre en place, dès le départ, une association comportant la réalisation d'un chenal enherbé sur cet axe érodable.

Notez qu'il faut aussi penser à l'aval, dans un souci d'efficacité globale. De manière évidente, il faut veiller à ce qu'une nouvelle ravine ne se forme pas 10 à 20 m en aval, sous peine d'avoir un impact nul à l'échelle du territoire. Il peut être nécessaire de mettre en place un chenal enherbé sur le talweg aval. A défaut, il faudrait envisager la création d'une série de fascines à écartement régulier sur toute la longueur du talweg.

5.8 - A l'échelle du bassin versant, insertion d'une haie ou d'une fascine à but sédimentaire dans un aménagement linéaire à but paysager, cynégétique, énergétique ou autre

Le développement local de politiques en faveur d'actions paysagères, cynégétiques ou en faveur du développement de la filière bois-énergie à partir des haies, offre une possibilité de traiter en même temps une partie des problèmes d'érosion par ruissellement concentré sur un axe de talweg, ou au coin d'une parcelle. Il s'agit par exemple d'insérer dans un linéaire de haie des tronçons d'aménagements "à caractère hydraulique", à chaque fois que cela est utile (Figure 46).

Ainsi, avec une haie de plusieurs centaines de mètres en bordure de champs :

- ▶ le tronçon qui croise un départ de talweg peut avoir pour but de retenir les sédiments issus de l'érosion ;
- ▶ une partie peut avoir un rôle cynégétique ;
- ▶ une autre peut avoir un rôle d'infiltration de ruissellement diffus ;
- ▶ une autre encore peut avoir un rôle de maillage de la trame verte avec un volet biodiversité plus marqué ;
- ▶ et une dernière pourrait avoir un rôle de production de bois-énergie, etc...

Chacune de ces parties de la haie devra avoir des caractéristiques adaptées à l'objectif visé qu'il soit économique, environnemental, de biodiversité ou cynégétique. La complémentarité des fonctions nécessite de réaliser un bon diagnostic initial sur le terrain et de bien préciser les objectifs poursuivis.



▶ **Figure 46 :**

Exemple de haie multifonctionnelle, une association haie dense + fascine dans le talweg et la haie se prolonge de chaque côté pour créer un maillage propice à la biodiversité à l'échelle de l'exploitation agricole

6 - Exemple d'analyse coût-bénéfice appliquée au cas d'une fascine située en aval d'une parcelle cultivée, pour protéger un lotissement des coulées de boue

Les conséquences de l'érosion des sols sont multiples et entraînent généralement des charges supplémentaires pour les collectivités. Il y a des conséquences directes et indirectes :

- ▶ *le nettoyage des voiries ;*
- ▶ *le curage des ouvrages et des réseaux d'eaux pluviales ;*
- ▶ *les coûts liés à la dégradation de la ressource en eau sur une période plus ou moins longue, obligeant parfois :*
 - ◆ *à interrompre la distribution en eau potable et à distribuer de l'eau en bouteille,*
 - ◆ *à nettoyer les réseaux,*
 - ◆ *à construire des usines de traitement de la turbidité et à changer plus souvent les filtres fort onéreux.*
- ▶ *les pollutions par les MES de piscicultures, de cressonnières ;*
- ▶ *l'envasement de tronçons de cours d'eau ;*
- ▶ *la perte de cultures par le recouvrement des plantes ;*
- ▶ *les dégâts aux particuliers ;*
- ▶ *les frais de transport en décharge classée pour les boues de curage de certains ouvrages..*

Les maîtres d'ouvrage cherchent à mettre en place des aménagements de type "zones tampons" en protection rapprochée d'enjeux, pour éviter le comblement trop rapide des ouvrages par les sédiments. Cette politique est efficace sur le plan technique. Pour examiner dans quelle mesure elle est avantageuse au plan économique, une analyse de type coût - bénéfice a été réalisée. Elle repose sur plusieurs hypothèses et simplifications. Bien que celles-ci soient toutes justifiées et en correspondance avec la réalité et avec les mesures de terrain, il reste une incertitude quant à la valeur des résultats. Ainsi, ce travail a valeur d'exemple et il cherche à faire ressortir des ordres de grandeur comme le font les Analyses Coût Bénéfice dans d'autres domaines.

6.1 - Présentation de l'étude de cas

Cette étude s'appuie sur un cas réel. On cherche à déterminer l'équilibre économique d'une fascine, pour protéger un lotissement des coulées de boue provenant d'une parcelle agricole unique, et débouchant sur les voiries et dans quelques maisons. **On réduit donc les bénéfices à la quantité de terre à nettoyer après des événements ruisselants.**

6.1.1 - Hypothèses posées

Quatre séries d'hypothèses de travail ont été retenues pour réaliser cette analyse.

Première série d'hypothèses : la parcelle agricole couvre 7,82 ha avec une pente de 3 %. Elle a subi de nombreux phénomènes de ruissellement et d'érosion dans les années 1990 (Figure 47). On considère que l'état de surface de la parcelle correspond à un semis d'automne-hiver. La parcelle génère de l'érosion sous forme de griffures et de ravines. La granulométrie des MES transportées correspond aux essais avec le matériau tamisé à 1 mm.

Deuxième série d'hypothèses : la fascine est installée dans le point bas de concentration des écoulements sur une pente de 1 %. Elle fait 20 m de long. Sur une durée de 10 ans, elle sera rechargée en fagots et rallongée au besoin, suivant les quantités de terre accumulées en amont. Les quantités de sédiments stockables sont estimées à 167 m³.



► **Figure 47 :**

Plan de la parcelle agricole et de la fascine - Le Bourg Dun
(Source : www.geofoncier.fr)



► **Figure 48 :**

Fascine du Bourg-Dun
Vue de l'amont
Vue de l'aval

Troisième série d'hypothèses : la gamme des pluies retenues est la même que celle utilisée dans l'étude GESSOL (LE BISSONNAIS *et al.*, 2003). Ce sont des pluies de type hivernal (saison la plus érosive), longues et peu intenses, choisies dans le cadre d'un test effectué dans le nord de la France. Trois types de pluies sont utilisés (Tableau 20).

Nom de la pluie	Hauteur (mm)	Durée (h)	Occurrence
Pluie 1	20.0	6	3 mois
Pluie 2	33.3	6	6 ans
Pluie 3	37.2	6	10 ans

► **Tableau 20 :**

Gamme des pluies retenues pour l'analyse coût-bénéfice

Avec ces pluies de projet et selon le même formalisme que celui de l'étude GESSOL, nous avons construit trois cycles types, chacun composé des trois périodes de durées : 1 an, 6 ans et 10 ans (respectivement nommées durée 1, durée 6, durée 10), dans lesquelles les pluies de projet sont utilisées (Tableau 21).

Le cycle dit humide = cas N° 1 est celui utilisé dans l'étude GESSOL. Il correspond à un cycle d'années humides susceptible d'être rencontré sur des durées d'1 an (avec 4 pluies 1), de 6 ans (avec au total 24 pluies 1 - 4/an - et 1 seule pluie 2) et de 10 ans. Par exemple en Seine-Maritime, les années 1990-2000 illustrent parfaitement un cycle de 10 années humides.

Le cycle dit sec = cas N° 2. Il correspond à un cycle d'années sèches susceptibles d'être rencontré sur des durées d'1 an, 6 ans et 10 ans. Il se différencie du cycle sec (cas N° 1) par un nombre plus restreint de petites pluies (la pluie 1 ne se produit qu'une fois par an). Par exemple en Seine-Maritime, les années 2001-2011 illustrent un cycle de 10 années sèches.

Un cycle particulier où des techniques culturales anti-érosives sont mises en oeuvre sur les parcelles amont = cas N° 3. C'est un cas de figure où l'agriculteur utilise des « techniques culturales anti-érosives ». L'hypothèse est faite qu'il s'agit de techniques simples sans coût supplémentaire et qu'elles sont efficaces uniquement sur la pluie 1, pour laquelle il n'y a plus d'export de terre en dehors de la parcelle.

► **Tableau 21 :**
Présentation du nombre de pluies de chaque type (Nb Pluie) par durée de 1 à 10 ans et pour chaque cycle

	Durée		Nb Pluie 1	Nb Pluie 2	Nb Pluie 3
Cycle humide (Cas N°1)	Durée 1	1 an	4	0	0
	Durée 6	6 ans	24	1	0
	Durée 10	10 ans	40	1,66	1
Cycle sec (Cas N°2)	Durée 1	1 an	1	0	0
	Durée 6	6 ans	6	1	0
	Durée 10	10 ans	10	1,66	1
Techniques culturales anti-érosives (Cas N°3)	Durée 1	1 an	0	0	0
	Durée 6	6 ans	0	1	0
	Durée 10	10 ans	0	1,66	1

Quatrième série d'hypothèses :

Deux coûts de curage ont été testés :

- pour des matériaux considérés comme pouvant être épandus sur les champs, un coût minimal à 17 €/m³ correspondant au nettoyage et au curage mécanique de la voirie, au chargement des produits de curage dans un camion, au transport et à la remise des produits de curage à l'amont de la parcelle ;
- pour des matériaux considérés comme « déchets » (impossibles à épandre), un coût moyen à 48 €/m³ correspondant au coût de nettoyage et de curage de la voirie, au coût d'analyse, au chargement des produits de curage dans un camion, au transport et au stockage des produits de curage dans une décharge appropriée.

6.1.2 - Scenarii testés

Deux scénarii ont été choisis :

Scénario 1 : il n'y a pas de fascine réalisée à l'amont du lotissement.

Scénario 2 : mise en place d'une fascine par la collectivité en réalisant une servitude avec D.I.G. et dont l'entretien est réalisé par la collectivité.

6.1.3 - Matériel et données utilisés

Les calculs de débits liquides et de débits solides ont été réalisés avec le logiciel VFS-MOD¹. L'estimation de la sédimentation a été réalisée en appliquant les résultats obtenus dans la partie précédente (Equation 5 rappelée ci-dessous), et après avoir vérifié que le débit spécifique était toujours inférieur à 7 l/s/ml.

$$Exp_{total} = 0,0441 \cdot Q_s$$

Équation 5 avec :

► Exp_{total} : taux de transfert (%)

► Q_s : débit spécifique (l/s/ml)

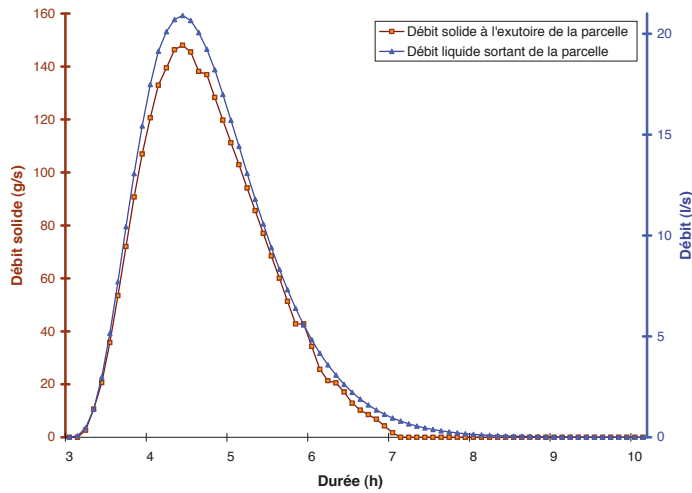
L'évaluation des coûts de mise en place et d'entretien de la fascine a été calculée avec l'outil Excel conçu par l'AREAS en 2008 dans le cadre du programme de recherche Risques Décisions Territoires "AcTerre" (MARTIN, 2009), et disponible sur le site Internet de l'AREAS (<http://www.areas.asso.fr>).

6.2 - Résultats techniques

6.2.1 - Méthode d'estimation des quantités de sédiments produits par l'érosion

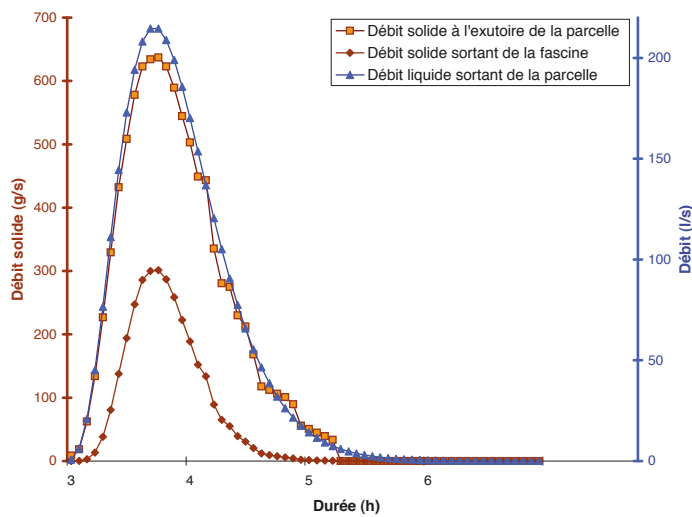
Le logiciel VFS-MOD a permis d'estimer, pour chacune des trois crues, les débits liquides et solides sortant de la parcelle (exemple sur la Figure 49).

¹ Vegetative Filter Strip Modeling System – Agricultural and Biological Engineering of the University of Florida (USA)



► **Figure 49 :**
Exemple de débit liquide et de débit solide sortant de la parcelle de 7,8 ha pour la pluie 1

Cela permet ensuite de calculer minute par minute le taux de transfert des sédiments traversant la fascine.



► **Figure 50 :**
Comparatif des débits solides à l'exutoire de la parcelle de 7,8 ha avec et sans mise en place de la fascine pour la pluie 3

Après avoir vérifié que les débits liquides spécifiques étaient bien compris dans le domaine de validité des débits expérimentaux testés, les débits solides sortant de la parcelle, avec et sans mise en place de la fascine, ont été calculés pour les trois pluies testées (Tableau 22).

	Sédiments exportés				Taux d'abattement
	sans fascine		avec fascine		
	masse (t)	masse (t/ha/an)	masse (t)	masse (t/ha/an)	
Pluie 1	7,1	0,9	0,2	0,0	96,7%
Pluie 2	30,5	3,9	7,5	1,0	75,4%
Pluie 3	39,4	5,0	13,1	1,7	66,8%

► **Tableau 22 :**
Quantité de sédiments exportés de la parcelle, avec et sans mise en place de la fascine pour les pluies 1, 2 et 3

Ainsi, on obtient pour les pluies 1, 2 et 3 des exportations de terre hors de la parcelle, en l'absence de fascine, estimées respectivement à 7,1 30,5 et 39,4 tonnes, soit 0,9 3,9 et 5,0 t/ha/an.

Dans l'ensemble, les résultats de sédiments exportés sans fascine (exprimés en t/ha/an) sont cohérents avec ceux mesurés par LUDWIG (1992), LE BISSONNAIS (1996), et EVRARD (2010).

6.2.2 - Estimation des quantités de sédiments à curer dans le lotissement avec mise en place de la fascine

Le Tableau 23 résume les taux d'abattement pour chacun des trois cycles comparés et pour chaque pluie.

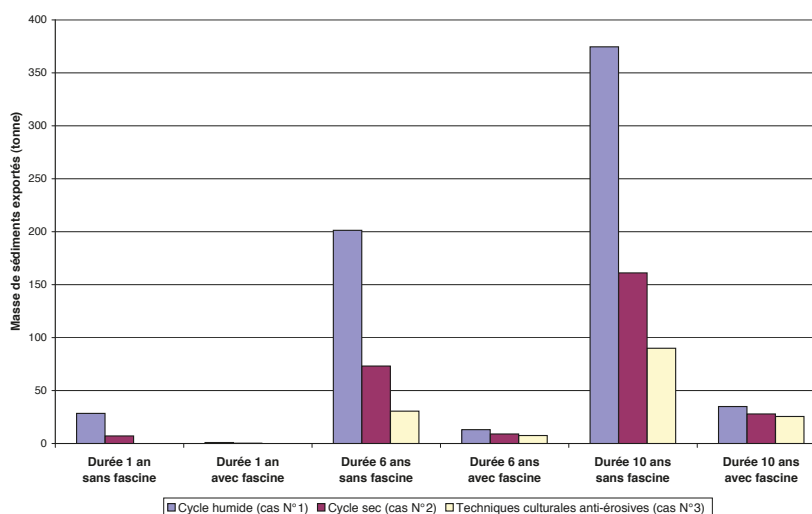
► **Tableau 23 :**
Quantité de sédiments exportés de la parcelle avec et sans mise en place de la fascine pour tous les événements simulés

		Sédiments exportés				Taux d'abattement
		sans fascine		avec fascine		
		masse (t)	masse (t/ha/an)	masse (t)	masse (t/ha/an)	
Cycle humide (Cas N°1)	Durée 1	28,4	3,6	0,9	0,1	96,7%
	Durée 6	200,9	4,3	13,1	0,3	93,5%
	Durée 10	374,0	4,8	34,9	0,4	90,7%
Cycle sec (Cas N°2)	Durée 1	7,1	0,9	0,2	0,0	96,7%
	Durée 6	73,1	1,6	8,9	0,2	87,8%
	Durée 10	161,0	2,1	27,9	0,4	82,7%
Techniques culturales anti-érosives (Cas N°3)	Durée 1	0,0	0,0	0,0	0,0	Néant
	Durée 6	30,5	0,7	7,5	0,2	75,4%
	Durée 10	90,0	1,2	25,6	0,3	71,6%

Avec la mise en place de la fascine, les exportations de terre ont été en moyenne divisées par 10. Pour les situations classiques correspondant aux cycles humide et sec avec, pour chacun, les 3 durées de 1, 6 et 10 ans, le taux d'abattement des MES par la fascine est compris entre 82,7 et 96,7 % (Tableau 23).

Les quantités de sédiments susceptibles de se retrouver sur la voirie varient de 0,2 à 0.9 tonnes sur 1 an, et de 27,9 à 34,9 tonnes sur 10 ans (Figure 51).

► **Figure 51 :**
Comparaison des quantités de sédiments susceptibles de se retrouver sur la voirie, avec et sans mise en place de la fascine, pour les trois cas de figure simulés et pour différentes durées



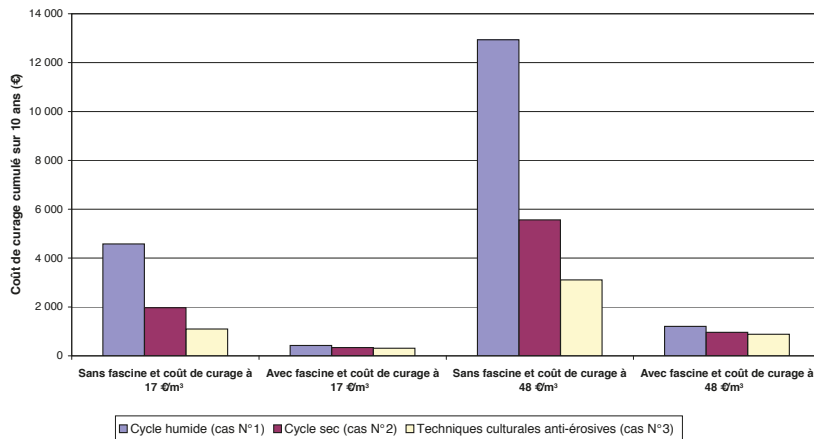
Dans le cas du cycle humide, vu la différence entre la quantité de sédiments érodés et le taux de sédimentation, la fascine sera entièrement comblée entre 6 et 10 ans. Il est nécessaire de la rallonger de 10 m pour atteindre un stockage de 250 m³, afin qu'elle reste efficace sur une durée de 10 ans.

6.3 - Résultats économiques

L'approche économique compare uniquement le coût de curage avant mise en place de la fascine, avec le coût de mise en place de la fascine et le coût de curage évité. C'est donc une analyse coût-bénéfice restreinte qui est présentée ici.

6.3.1 - Coût de curage dans le lotissement avec et sans mise en place de la fascine

A partir des quantités de sédiments érodés, le coût de curage a été estimé pour les 2 coûts unitaires retenus : 17 et 48 €/m³ (Figure 52).



► **Figure 52 :**
Coût de curage des sédiments susceptibles de se retrouver sur la voirie sur 10 ans, avec et sans mise en place de fascine, pour les différents cas de figure étudiés avec des coûts de curage à 17 et 48 €/m³

Sans fascine et avec un scénario de curage à 48 €/m³, on constate que ces coûts sont importants. Les dépenses de curage et de nettoyage d'une voirie en aval d'une seule parcelle agricole peuvent varier de 5 500 € à 13 000 € sur 10 ans, selon que le cycle est humide ou sec. La réduction des ruissellements par des techniques culturales anti-érosives (cas N° 3) permet une diminution conséquente des coûts de curage qui s'élèvent alors à 3 100 € sur 10 ans.

Avec un scénario de coût de curage à 17 €/m³, les coûts de curage sont divisés par 3 en moyenne.

Avec fascine et un scénario de curage à 48 €/m³, les dépenses de curage varient de 900 € à 1 200 € sur 10 ans pour les différentes situations climatiques. Avec un scénario de coût de curage à 17 €/m³, les dépenses de curage sont 3 fois plus faibles.

Economiquement, la protection d'une zone habitée paraît intéressante à étudier au regard des coûts de curage.

6.3.2 - Coût de mise en place et d'entretien de la fascine

Le coût de mise en place de cette fascine est de 3 070 €. Ce coût comprend la mise en place de la fascine par une entreprise, la réalisation de la DIG, la servitude et les indemnités versées par la collectivité au propriétaire et à l'exploitant du terrain.

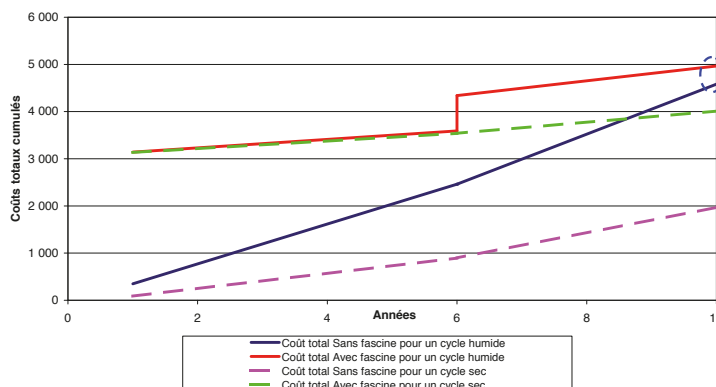
Sur 10 ans, les coûts d'entretien sont estimés à 600 €.

Pour le cas du cycle humide, après 6 ans, un rallongement de 10 m de la fascine est nécessaire pour conserver toute son efficacité. Cela engendre un surcoût, le coût total de la fascine sur 10 ans passe à 4 500 € tout compris.

6.3.3 - Bilan coût - bénéfice sur la base des coûts de curage

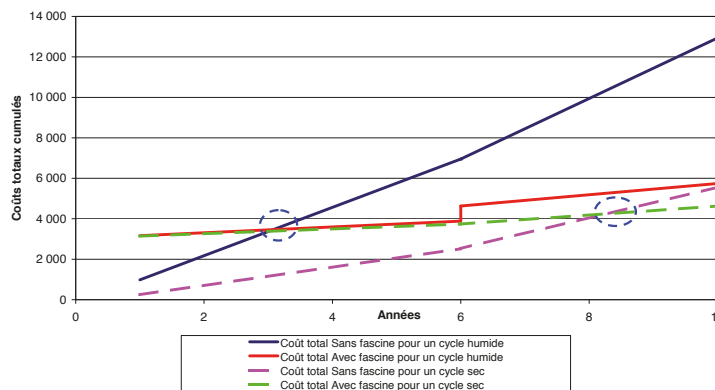
Examen des résultats pour les décennies humides ou sèches

Les Figures 53 a et 53 b présentent les coûts cumulés sur 10 ans pour chacun des 2 scénarii testés, avec et sans fascine, sur les 2 cycles climatiques (humide et sec).



► **Figure 53 a :**
Coûts totaux cumulés sur 10 ans, avec et sans mise en place de fascine, pour les différents cas de figure étudiés et avec des coûts de curage à 17 €/m³

► **Figure 53 b :**
Coûts totaux cumulés pour la collectivité sur 10 ans, avec et sans mise en place de fascine, pour les différents cas de figure étudiés et avec des coûts de curage à 48 €/m³



Les résultats pour les deux cycles climatiques montrent que, sur 10 ans seulement : deux scénarii sont rentables, un autre s'équilibre presque et un dernier est déficitaire pour la collectivité.

Avec un tarif de curage à 48 € TTC/m³, les 2 scénarii de décennies sèches ou humides sont rentables :

- *décennie humide : bien que pour ce scénario, il faille rallonger la fascine de 10 m au bout de 6 ans, ce scénario est rentable à partir de la 3^e année d'implantation de la fascine (Figure 53 b). La collectivité a ainsi un retour sur investissement très rapidement, et les gains sont d'environ 7 200 € au bout de 10 ans.*
- *décennie sèche : la rentabilité de l'opération est atteinte à partir de la 8^e année, et les gains escomptés sont estimés à 900 € au bout de 10 ans (Figure 53 b).*

Ces 2 scénarii constituent les cas de figure les plus rencontrés par les collectivités. En effet, les produits de curage sont généralement autour de 50 € TTC, s'ils sont envoyés dans une zone de stockage (décharge). Il est intéressant de constater qu'à ce tarif quelles que soient les conditions climatiques, la collectivité est toujours bénéficiaire.

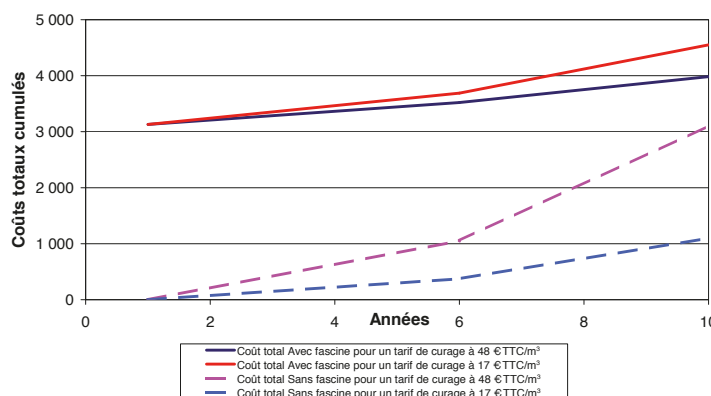
Avec un coût de curage à 17 € TTC/m³, le scénario associé à un cycle humide, s'équilibre à peu près, puisque le point d'équilibre se situe autour de 18,6 € du m³ curé (Figure 53 a). Ainsi, même avec un coût de curage faible à 17 €/m³, la réalisation, le rallongement et l'entretien de la fascine sont des opérations sans gain, ni perte pour la collectivité.

Pour une décennie sèche et avec un coût de curage à 17 € TTC /m³, les pertes sont légèrement supérieures à 2 000 € (Figure 53 a). Ceci pourrait être une charge tout à fait supportable pour une collectivité lorsqu'il s'agit de protéger un enjeu prioritaire. Dans ce cas de figure, il faudrait 20 à 30 ans pour atteindre le point d'équilibre. Sur une telle durée, on peut se demander si le bilan coût-bénéfice n'aurait pas été positif avec une haie plutôt qu'une fascine.

Examen des résultats pour le cas de la mise en œuvre des pratiques anti-érosives

Sur 10 ans, les 2 scénarii de mise en place d'une fascine par la collectivité, en complément de techniques culturales anti-érosives réalisées par l'agriculteur, sont déficitaires (Figure 54). Les pertes sont d'environ 1 450 € TTC pour un coût de curage à 48 €/m³, et d'environ 2 900 € TTC pour un coût de curage de 17 €/m³.

► **Figure 54 :**
Comparaison des coûts totaux cumulés en cas de mise en œuvre de pratiques anti-érosives



Par ailleurs, dans ces conditions, on peut également se demander si le bilan coût-bénéfice n'aurait pas été positif avec une haie moins chère à la réalisation qu'une fascine.

Seuils de rentabilité de la fascine vis-à-vis uniquement des coûts de curage sur 10 ans

Trois seuils de rentabilité à l'échelle d'une décennie ont été calculés :

- ▶ en présence d'une décennie humide, à partir d'un coût de curage de 18,6 €/m³ : la fascine est rentable ;
- ▶ en présence d'une décennie sèche, pour un coût de curage supérieur à 38,3 €/m³ : la fascine devient rentable ;
- ▶ avec la mise en place de techniques agricoles anti-érosives, à partir d'un coût de curage de 79,15 € : la fascine est rentable.

6.3.4 - Autres scénarii possibles

Il serait certainement intéressant d'examiner d'autres hypothèses :

- ▶ un scénario où l'agriculteur est subventionné par la collectivité pour réaliser la fascine et où il l'entretient ensuite. Cela coûterait environ 1 500 € à la collectivité. Avec ce choix de mise en place, alors cinq des six scénarii testés seraient rentables sur 10 ans. Seul le scénario de mise en place de la fascine avec réalisation de techniques culturales moins érosives sur la parcelle amont, et avec un coût de curage à 17 €/m³, générerait des pertes pour la collectivité.
- ▶ un scénario sur la base d'une mise en place d'une haie, avec une étude économique sur une plus grande durée (20 à 30 ans).
- ▶ des scénarii qui tiennent compte des autres coûts d'impacts directs ou indirects pour les collectivités (les pollutions par les MES des captages d'eau potable, de piscicultures, de cressonnières ; l'envasement de tronçons de cours d'eau ; les dégâts aux particuliers...).
- ▶ des scénarii sous le seul angle du maître d'ouvrage (Syndicat de Bassin Versant ou Communauté de Communes) qui bénéficie de subventions pour la mise en œuvre de ces types d'aménagements. Dans ce cas, sur l'exemple traité précédemment, avec une aide de 60 % sur les frais d'étude (D.I.G.) et de mise en place de 20 m de fascine qui s'élèvent au total à 1 500 €, l'aide financière est de 950 €. Alors à l'échelle de 10 ans, il est aisé de constater que :
 - ◆ le scénario cycle humide avec un coût de curage à 17 € TTC/m³ devient rentable ;
 - ◆ le scénario cycle sec avec un coût de curage à 17 € TTC/m³ devient peu déficitaire ;
 - ◆ le scénario "techniques culturales moins érosives" avec un coût de curage à 48 € TTC/m³ devient peu déficitaire.

Les effets de la fascine sur le laminage des ruissellements, sur la biodiversité, sur l'appauvrissement des terres agricoles lié à l'érosion, et sur la pollution des captages ne sont pas chiffrés dans le cas présenté.

Il serait utile de reprendre ce type de démarche en tenant compte des bénéfices supplémentaires selon l'intérêt propre de chaque maître d'ouvrage ou financeur. Cela ne pourrait qu'améliorer la rentabilité des objets haies et fascines ou leurs associations.

6.4 - Bilan de la démarche « analyse coût – bénéfice »

Grâce à la connaissance des taux de sédimentation en amont de ces aménagements d'hydraulique rapprochée, et sur la base du formalisme des épisodes d'érosion proposé par l'INRA dans le rapport final du programme GESSOL (LE BISSONNAIS *et al.*, 2003), la réalisation d'une analyse coût-bénéfice devient possible et assez peu compliquée, notamment si l'on ne retient que la question des coûts de curage des sédiments.

La réalisation de telles analyses par les maîtres d'ouvrage apporte des résultats et des enseignements complémentaires utiles aux choix et aux prises de décisions, soit pour des situations simples soit pour des situations complexes correspondant à l'aménagement de petits bassins versants.

CONCLUSION

La première partie de ce travail visait l'approfondissement des connaissances sur les haies denses et les fascines, à partir d'expérimentations de terrain en conditions les plus proches possibles des phénomènes naturels. Les résultats obtenus ont permis de caractériser les fourchettes de variations des 3 principaux paramètres étudiés, à savoir la sédimentation, la réduction des vitesses et l'infiltration.

Ainsi, dans la gamme des débits spécifiques testés, compris entre 1 et 12 l/s/ml, et avec des concentrations en MES voisines de celles habituellement mesurées sur les bassins versants régionaux, des taux d'abattement très intéressants ont été obtenus : de l'ordre de 74 à 91 %, lorsque la charge solide est globalement composée d'1/3 de particules de granulométrie inférieure à 63 µm, d'1/3 de particules de granulométrie supérieure à 125 µm et d'1/3 de particules de granulométrie comprise entre 63 et 15 µm. Si les particules sont plus grossières, le taux de sédimentation est compris entre 93 % et 99 %. De tels résultats sont possibles grâce au rôle puissant de frein hydraulique que jouent les haies très denses et les fascines. Les vitesses d'écoulement sont limitées entre 0,01 et 0,10 m/s dans la zone d'eau calme en amont de ces barrières végétales. Parallèlement, les vitesses d'infiltration ont pu être évaluées notamment au droit des haies, ce qui a permis de démontrer leur réelle capacité d'infiltration estimée à 400 mm/h ± 100 mm/h.

Cela étant, ces résultats opérationnels sont intimement liés aux conditions expérimentales, aux méthodes disponibles, et il y aurait besoin de recherches complémentaires soit pour étendre la plage de validité, soit pour confirmer ces premières données. C'est notamment le cas pour les points suivants :

- ▶ *la gamme des débits spécifiques testés a été limitée à un maximum de 12 l/s/ml. Il conviendrait de tester des débits spécifiques plus élevés, jusqu'à 50 ou 100 l/s/ml, pour valider les résultats obtenus et la convergence avec les données bibliographiques déjà observées.*
- ▶ *d'un point de vue méthodologique, il est particulièrement ardu de mesurer la granulométrie réelle des particules véhiculées pendant la phase de ruissellement, et celle des particules déposées pendant l'expérimentation. Sans cette mesure, il est difficile de vérifier les résultats de dépôt par fraction, même si globalement, toute fraction confondue, les résultats paraissent cohérents avec la bibliographie. Cela peut avoir des conséquences notamment en cas de ruissellements diffus hivernaux sous pluie très peu intense (< 5 mm/h) et sans érosion en rigoles : le taux de sédimentation en amont d'une fascine ou d'une haie sera naturellement limité. Ce point renforce l'idée d'associer une bande enherbée en aval pour améliorer la sédimentation.*

La seconde partie de ce travail a un objectif directement opérationnel, en cherchant à valoriser de façon pratique les résultats des expérimentations. Afin que les techniciens puissent utiliser rapidement les résultats, les principaux enseignements ont été décrits en détail, que ce soit en terme de localisations pertinentes, de dimensionnement, de points forts et faibles, de modes de conduite, d'association avec d'autres zones tampons.

Un exemple d'analyse coût – bénéfice permet de mieux illustrer l'intérêt des haies denses et fascines, tout en démontrant que certaines conditions sont plus bénéficiaires que d'autres. Pour cet exemple, seules les questions économiques sous l'angle du curage ont été abordées. A l'avenir, il serait particulièrement utile de mieux connaître les autres impacts des ruissellements érosifs et leurs coûts. Cela permettrait de mettre dans la balance des coûts de dégâts plus complets, et de démontrer que le seuil de rentabilité des haies et fascines est moins élevé que celui obtenu dans le cadre de ce travail.

PERSPECTIVES ET SOUHAITS

À court terme, ce travail a été conduit pour que les résultats contribuent au développement rapide de ce type d'aménagement selon le concept :

"Mettre en place une Haie dense, ou une Fascine, ou une Haie dense doublée d'une Fascine sur le chemin de l'eau à l'échelle de mon exploitation" par les exploitants agricoles et les propriétaires fonciers, avec l'appui des techniciens des collectivités, afin d'assurer une cohérence d'ensemble, seule garante d'une bonne efficacité dans l'intérêt de tous.

La publication de cette brochure de synthèse est le vecteur principal de la diffusion des connaissances, mais d'autres outils sont disponibles comme les fiches techniques, le rapport général de ce projet et le diaporama de formation.

À moyen terme, le travail doit être poursuivi avec les acteurs régionaux sur deux aspects :

- ▶ *premièrement, pour atteindre une efficacité optimale des haies pour réduire l'érosion, les objectifs de densité en nombre de tiges sont élevés : plus de 50 tiges/ml. On fait l'hypothèse qu'une densité de plantation d'environ 6 plants/ml de haie est nécessaire. Mais, en fonction des espèces choisies, de la concurrence entre les espèces, de la sensibilité aux agressions (maladies, etc...), de la difficulté et du mode d'entretien, d'un double objectif éventuel, le choix des espèces devra être affiné ainsi que la densité de plantation. In fine, un besoin de suivi de l'évolution à long terme des essences végétales semble nécessaire. De la même manière, il serait utile de suivre la solution d'implantation de plançons de saule contre les fascines, pour la comparer avec la solution de haies multi-espèces. Une partie des réponses pourra à terme être apportée par le projet « Hairoision ». Porté par l'AREAS, ce projet vise à suivre une vingtaine de modalités de haies et de fascines dont la densité, les espèces, l'entretien sont différents.*
- ▶ *deuxièmement, pour faciliter le développement des haies ou des associations à base de haies et de fascines, il serait certainement utile de mieux affûter l'argumentaire en valorisant la haie comme une barrière végétale multifonctionnelle. Elle peut prendre des formes différentes et apporter de nombreux bénéfices qu'il faut savoir mettre en avant pour la faire accepter (agronomique, économique, environnemental, de loisirs...).*

Tous ces points demandent à être étudiés ou précisés avec tous les acteurs régionaux de la haie et des filières de sa valorisation et qu'en même temps soit réfléchi la création d'un réseau à l'échelle locale.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALEGRE J., PASHANASI B. et P. LAVELLE P., 1996. Dynamics of soil physical properties in a low input agricultural system inoculated with the earthworm *Pontoscolex corethrurus* in Peruvian Amazonia, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 1522-1529.
- ALLAIN-JEGOU C., 2002. Relations végétation-écoulement-transport solide dans le lit des rivières – Etude de l'Isère dans le Grésivaudan, Thèse de Doctorat, Inst. Nat. Polytech. de Grenoble, spécialité Mécanique des milieux géophysiques et environnement, 198 p.
- ANGIMA S.D., STOTT D.E., O'NEILL M.K., ONG C.K. et WEESIES G.A., 2002. Use of calliandra-napier grass contour hedges to control erosion in central Kenya.
- AUZET A.V., 1987. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture: aspects agronomiques. Ministère de l'Environnement et Ministère de l'Agriculture, Paris, CEREG, Strasbourg, Organisation-Environnement, 53 p. + annexes.
- AUZET A.V., BOIFFIN J., PAPY F., LUDWIG B., MAUCORPS J. et OUVRY J.F., 1990. An approach to the assessment of Erosion Forms and Erosion Risk on Agricultural Land in the Northern Paris Basin, France. In : J. BOARDMAN, D.L. FOSTER and J.A. DEARING (Editors), *Soil Erosion on Agricultural Land*. Wiley, Chichester, pp. 383-400.
- BOIFFIN J., PAPY F., PEYRE Y., 1986. Systèmes de production, systèmes de culture et risques d'érosion dans le Pays de Caux. Rapport INA-PG, INRA, 154 p. + annexes.
- BOIFFIN J., PAPY F., EIMBERCK M., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I.- Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie* 8: 663-673.
- CARLUER N., GIANNONE G., GOUY V., GRILL J.J., 2009. Towards a tool design vegetated strips for mitigation of pesticides transfers in surface runoff. Assessment of different scenarios. *Pesticides Behaviour in Soils, Water and Air* 14/09/2009-16/09/2009, York, GB. 2 p.
- CARLUER N., TOURNEBIZE J., GOUY V., MARGOUM C., VINCENT B., GRILL J.J. – 2009. Role of buffer zones in controlling pesticide fluxes to surface waters. *Ecological Engineering : from Concepts to Applications* 01/12/2009-03/12/009, Paris, FRA. 1 p.
- CARNET C., 1978. L'effet anti-érosif du bocage en région granitique de Bretagne. Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. Strasbourg Colmar 20-23 sept 78. Université Louis Pasteur, INRA Colmar : 153-156.
- CAUBEL V., 2001. Influence de la Haie de Ceinture de Fond de Vallée sur la Dynamique de l'eau et des Solutés à son voisinage. Thèse de Doctorat, ENSA Rennes, 159 p.
- CERDAN O., 2001. Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés. Université d'Orléans – INRA Paris. Thèse, 186 p.
- CERDAN O., LE BISSONNAIS Y., SOUCHERE V., MARTIN P., LECOMTE V., 2002. Sediment concentration in interrill flow : interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 193-205.
- CORPEN, 1997. Produits phytosanitaires et dispositifs herbés – Etat des connaissances et propositions de mise en œuvre. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche – Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 88 p.
- CORPEN, Groupe Zones Tampons, 2007. Les fonctions environnementales des zones tampons : les bases scientifiques et techniques des fonctions de production des eaux. Ministère du Développement Durable, 75 p.
- 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*, 38:1719-1729.
- DABNEY S.M., 1999. Dynamic replacement and loss of soil carbon on eroding cropland. *Global. Biogeochemical Cycles* 13, No. 04, p. 885-903. Harden, J.W., T.
- DE PLOEY J., 1989. Erosion systems and perspectives for erosion control in European loess areas. *Soil Technology Series* 1, 93-102
- EVARD O., NORD G., CERDAN O., SOUCHERE V., LE BISSONNAIS Y., BONTÉ P., 2010. Modelling the impact of land use change and rainfall seasonality on sediment export from an agricultural catchment of the northwestern European loess belt. *Agricultural Ecosystems and Environment* (2010), 12 p.
- FOSTER G.R., 1990. Process-based modelling of soil erosion by water on agricultural land. Dans Boardman, J; Foster I. & Dearing, J., éditeurs, *Soil erosion on agricultural land*, pages 429-445. John Wiley and Sons.
- FREEMAN G.E., RAHMEYER W.H., COPELAND R.R., 2000. "Determination of Vegetative Resistance Due to Shrubs and Woody Vegetation", Technical Report ERDC/CHL TR-00-25, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
- GOVERS G., 1985. Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion. *Catena*, Vol. 12, pp. 35-49.
- GOVERS G., 1991. A field study on topographical and topsoil effects on runoff generation. *Catena* 18, 91-111.
- GRILL J.J., DUVOUX B., 1991 - Maîtrise du ruissellement et de l'érosion. Conditions d'adaptation des méthodes Américaines. CEMAGREF. 157 p.
- GRILL J.J., LE HENAFF G., FAIDIX K., 2010. Mise en place de zones tampons et évaluation de l'efficacité de zones tampons existantes destinées à limiter les transferts hydriques de pesticides, Guide de diagnostic à l'échelle de petit bassin versant. Cemagref Lyon. 42 p. [MAAP/DGPAAT/BSE/PRG.EAHER]
- HAAN C.T., BARFIELD B.J. and HAYES J.C., 1994. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. Academy Press, San Diego, CA, USA. 588 p.
- HUDSON N., 1981 - *Soil Conservation*. 2nd Ed. Bastford Academic and Educational Ltd., London, 324 p.
- KIEPE P., 1995. No runoff, no soil loss : soil and water conservation in hedgerow barrier systems.
- KIRKBY M.J., MORGAN. R.P.C., 1980 - *Soil Erosion*, 312 p.
- KÖNIG D., 1992. L'agriculture écologique agroforestière : une stratégie intégrée de conservation des sols au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 7, ORSTOM Montpellier : 185-191.
- LACAS J.G., 2005. Processus de dissipation des produits

- phytosanitaires dans les zones tampons enherbées ; étude expérimentale et modélisation en vue de limiter la contamination des eaux de surface. Thèse Université de Montpellier – Cemagref Lyon. 306 p
- LE BISSONNAIS Y., BENKHADRA H., GALLIEN E., EIMBERCK M., FOX D. MARTIN P., DOUYER C., LIGNEAU L., OUVRY J.F., 1996. Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse sur sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m² au bassin versant élémentaire agricole. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* n° 3. pp. 51-64.
- LE BISSONNAIS Y., COUTURIER A., CERDAN O., PAPY F., MARTIN P., SOUCHERE V., BRUNO J.F., LEBRUN P., FOX D., MORSCHER J., ELYAKIME B., 2003 - Maîtrise de l'érosion hydrique des sols cultivés. Phénomènes physiques et dispositifs d'action. Rapport final Programme GESSOL, 70 p.
- LECOMTE V., 1999. Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant – Processus, déterminisme et modélisation spatiale. Thèse de doctorat de l'ENGREF, 212 p.
- LECOMTE V., BARRIUSO E., BRESSON L.M., KOCH C. and LE BISSONNAIS Y., 2001. Soil surface structure effect on isoproturon and diflufenican loss in runoff, *J. Environ. Qual.* 30 (2001), pp. 2113-2119.
- LEE K.H., ISENHART T.M., SCHULTZ R.C., MICKELSON S.K., 2000. Multispecies riparian buffers trap sediment and nutrients during rainfall simulations. *Journal of Environmental Quality*, vol. 29, pp. 1200-1205.
- LEGUEDOIS S., 2003. Thèse Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés. Thèse de doctorat. Université d'Orléans. 176 p.
- LUDWIG B., 1992. L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du bassin parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg, 155 p.
- MARTIN P., 2009. Programme Risques Décisions Territoires : « Anticiper et Accompagner des évolutions de Territoires agricoles sensibles aux coulées boueuses – AcTerre ». Rapport final, INRA-UMR SAD APT, 182 p.
- MATHEJA A., STOSCHEK O., 1998. Influence of extrem events on sedimentation in sedimentation fields enclosed by brushwood fences. *Conf. on Hydroinformatics*, Copenhagen, 24.-26. August 1998, 8 p.
- MEROT P., 1978. Bocage : Sols et Eau, Tome 1. Le bocage en Bretagne granitique, une approche de la circulation des eaux. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1.
- MEROT P., 1999. The influence of hedgerow systems on the hydrology of agricultural catchments in a temperate climate. *Agronomie*, 19 (8), 655-669.
- MUÑOZ-CARPENA R., and J.E. PARSONS, NDAYIZIGIE F., 1992. Valorisation des haies arbustives (*Calliandra* et *Leucaena*) dans la lutte contre l'érosion au Rwanda. *Bull. Réseau Erosion* 12: 120-129.
- OUVRY J.F., LE BISSONNAIS Y., MARTIN P., BRICARD O., SOUCHERE V., 2010. Les couverts herbacés comme outils de réduction des pertes en terre par érosion hydrique. (Synthèse des connaissances et expérience de la Haute-Normandie). Journées AFPF - les usages émergents des prairies et des fourrages - 30-31 mars 2010, pp. 29-40.
- RICHET J.B., OUVRY J.F., 2010. Synthèse des mesures de ruissellement, bassin versant de Bourville, enregistrements de 1995 à 1999, AREAS, 235 p.
- PACEVICIUS A.E., 2008. Lutte contre l'érosion des sols et contre les coulées d'eaux boueuses : utilisation de méthodes rustiques. Mémoire de stage Master II, Mention Géosciences, Environnement, Risques – Spécialité « Risques Technologiques et Naturels » - Parcours « Risques Naturels » - Université de Strasbourg, 50 p.
- PANINGBATAN E.P., CIESIOLKA C.A., COUGHLAN K.J., et ROSE CW, 1995. Alley cropping for managing soil erosion of hilly lands in the philippines. *Soil Technology*, 8 : 193-204
- PAPY F., BOIFFIN J., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II. Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie* 881 : 745-756.
- POESEN J.W.A., 1989. Conditions for gully formation in the belgian loam belt and some ways to control them. *Soil Technology Series* 1, pp 39-52.
- REE W.O., 1949. Hydraulic characteristics of vegetation for vegetated waterways. *Agricultural Engineering* 30(4), 184-189.
- REY F., 2005. Efficacité des ouvrages de génie biologique pour le piégeage des sédiments dans des ravines incisées dans des marnes (alpes du sud, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 1/2005. 16 p.
- ROOSE E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. *Bulletin pédagogique de la FAO* n° 80 2d. FAO, 422 p.
- ROOSE E., BERTRAND R., 1971. Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest. Résultats expérimentaux et observations sur le terrain. *Agron. Trop.* 26(11) : 1270-1283.
- SOUCHERE V., 1995. Modélisation spatiale du ruissellement à des fins d'aménagement contre l'érosion des talwegs. Application à des petits bassins versants du Pays de Caux (Haute Normandie). Thèse de docteur de l'INA-Paris Grignon. 200 pp + annexes.
- SOUILLER C., COQUET Y., POT V., BENOIT P., REAL B., MARGOUM C., LAILLET B., LABAT C., VACHIER P., DUTERTRE A., 2002. Dissipation des produits phytosanitaires à travers un dispositif enherbé : mise en évidence des processus mis en jeu par simulation de ruissellement et infiltrométrie (Capacités de stockage et d'épuration des sols de dispositifs enherbés vis-à-vis des produits phytosanitaires. *Partie 1*). *Etude et Gestion des Sols*, Vol. 9, 2002, pp 269-285.
- TSUJIMOTO T., SHIMIZU Y., KITAMURA T., OKADA T., 1992. Turbulent open-channel flow over bed covered by rigid vegetation. *Journal of hydroscience and Hydraulic Engineering*, *JSCE* 10(2) : 13-25.
- VAN DIJK P., 2001. Soil erosion and associated sediment supply to rivers. Seasonal dynamics soil conservation measures and impacts of climate change. *Geography Thesis*, University of Amsterdam, 211 pp.
- VIAUD V., 2008. Impact des haies sur les transferts d'eau et de polluants dans les paysages agricoles. INRA Rennes. Formation AgroParisTech « Aménager l'espace rural pour limiter la pollution des eaux », 60 p.
- YOUNG A., 1997. *Agroforestry for soil management*. CAB International, UK Wallington.

ANNEXE 1 : TABLEAUX DE DONNÉES ET DE RÉSULTATS SUR LES VITESSES ET LES COEFFICIENTS DE MANNING

FASCINES	Débits			Section d'écoulement au droit de l'obstacle			Pente (m/m)	Coef. de Manning n
	Débit entrant (l/s)	Débit sortant (l/s)	Débit spécifique moyen (l/s/m)	Hauteur moyenne (m)	Largeur moyenne (m)	Vitesse (m/s)		
Cany-Barville	0,474	0,269	0,371	0,023	1,000	0,013	0,027	0,778
	1,089	0,802	0,946	0,044	1,000	0,021	0,027	0,886
	2,434	1,793	2,114	0,071	1,000	0,028	0,027	0,856
	3,304	3,045	3,174	0,104	1,000	0,031	0,027	1,039
	5,627	5,568	5,597	0,155	1,000	0,035	0,027	1,087
	2,793	2,447	2,620	0,091	1,000	0,029	0,027	1,022
	12,000	12,000	12,000	0,249	1,000	0,048	0,027	1,023
Neuville-Ferrières (Ent 1-6)	0,700	0,507	0,604	0,031	1,000	0,020	0,105	1,539
	1,131	0,952	1,042	0,042	1,000	0,025	0,105	1,504
	0,564	0,463	0,514	0,061	1,000	0,008	0,105	X
	2,168	2,064	2,116	0,073	1,000	0,029	0,105	1,778
	3,229	3,025	3,127	0,083	1,000	0,038	0,105	1,488
	6,176	6,220	6,198	0,094	1,000	0,066	0,105	0,913
	1,049	0,791	0,920	0,038	1,000	0,024	0,105	1,425
6,331	5,985	6,158	0,071	1,000	0,087	0,105	0,585	
Anglesqueville-La-Bras-Long	0,620	0,536	0,618	0,013	1,070	0,042	0,034	0,237
	1,284	1,176	1,316	0,024	1,070	0,048	0,034	0,312
	2,400	2,304	2,516	0,037	1,070	0,060	0,034	0,324
	3,473	3,402	3,678	0,046	1,070	0,071	0,034	0,317
	4,413	4,392	4,711	0,054	1,070	0,077	0,034	0,323
	5,092	5,228	5,521	0,060	1,070	0,081	0,034	0,325
	6,380	6,307	6,787	0,067	1,070	0,089	0,034	0,316
	12,039	12,039	12,882	0,122	1,070	0,092	0,034	0,430
	3,307	3,207	3,485	0,043	1,070	0,071	0,034	0,306
	3,344	3,238	3,521	0,056	1,070	0,055	0,034	0,464
3,300	3,129	3,440	0,053	1,070	0,057	0,034	0,422	
La Gaillarde 1 m	0,994	0,974	0,984	0,028	1,000	0,035	0,030	0,437
	2,002	1,990	1,996	0,052	1,000	0,038	0,030	0,592
	2,931	2,816	2,873	0,066	1,000	0,044	0,030	0,592
	6,271	6,182	6,227	0,121	1,000	0,051	0,030	0,708
	0,948	0,968	0,958	0,022	1,000	0,044	0,030	0,296
	1,907	1,849	1,878	0,035	1,000	0,053	0,030	0,335
	2,857	2,378	2,618	0,047	1,000	0,055	0,030	0,384
	6,077	5,394	5,736	0,089	1,000	0,064	0,030	0,480
La Gaillarde 0,5 m	0,989	0,914	1,903	0,082	0,500	0,023	0,032	1,208
	1,919	1,785	3,703	0,122	0,500	0,030	0,032	1,102
	2,885	2,640	5,524	0,163	0,500	0,034	0,032	1,118
	6,197	6,153	12,350	0,272	0,500	0,045	0,032	1,008
	0,972	0,886	1,858	0,051	0,500	0,037	0,032	0,588
	1,881	1,753	3,635	0,081	0,500	0,045	0,032	0,613
	2,750	2,558	5,309	0,100	0,500	0,053	0,032	0,578
6,155	6,101	12,256	0,180	0,500	0,068	0,032	0,580	
La Gaillarde 0,3 m	0,974	0,873	2,717	0,117	0,340	0,023	0,029	1,225
	1,927	1,746	5,402	0,186	0,340	0,029	0,029	1,162
	2,915	2,678	8,226	0,231	0,340	0,036	0,029	1,010
	4,388	4,089	12,465	0,314	0,340	0,040	0,025	0,918
	0,909	0,817	2,538	0,055	0,340	0,046	0,025	0,417
	1,912	1,738	5,369	0,109	0,340	0,049	0,025	0,528
	2,893	2,692	8,213	0,154	0,340	0,053	0,025	0,557
	6,069	6,227	18,082	0,255	0,340	0,071	0,025	0,488

FASCINES	Débits			Section d'écoulement au droit de l'obstacle			Pente (m/m)	Coef. de Manning n		
	Débit entrant (l/s)	Débit sortant (l/s)	Débit spécifique moyen (l/s/m)	Hauteur moyenne (m)	Largeur moyenne (m)	Vitesse (m/s)				
Saint-Gilles-de-la-Neuveville	1,213	1,152	1,182	0,028	1,000	0,042	0,034	0,390		
	0,709	0,674	0,692	0,020	1,000	0,034	0,034	0,385		
	1,713	1,571	1,642	0,037	1,000	0,044	0,034	0,441		
	2,700	2,551	2,626	0,054	1,000	0,049	0,034	0,507		
	3,686	3,550	3,618	0,066	1,000	0,055	0,034	0,507		
	4,768	4,694	4,731	0,085	1,000	0,056	0,034	0,577		
	6,810	6,917	6,864	0,111	1,000	0,062	0,034	0,603		
	2,140	1,874	2,007	0,040	1,000	0,050	0,034	0,410		
	2,144	1,950	2,047	0,046	1,000	0,044	0,034	0,503		
	4,972	4,791	4,882	0,089	1,000	0,055	0,034	0,598		
12,000	12,000	12,000	0,160	1,000	0,075	0,034	0,603			
Ganzeville	0,488	0,433	0,461	0,013	1,000	0,035	0,115	0,536		
	1,311	1,209	1,260	0,022	1,000	0,057	0,115	0,456		
	2,661	2,519	2,590	0,031	1,000	0,085	0,115	0,377		
	5,938	5,822	5,880	0,041	1,000	0,145	0,115	0,263		
	1,388	1,286	1,337	0,072	1,000	0,019	0,115	2,866		
	2,552	2,445	2,498	0,108	1,000	0,023	0,115	2,899		
	3,694	3,595	3,644	0,128	1,000	0,028	0,115	2,597		
	5,819	5,876	5,848	0,164	1,000	0,036	0,115	2,357		
Annouville-Vilmesnil	4,152	3,635	3,894	0,041	1,000	0,095	0,020	0,168		
	6,104	5,476	5,790	0,048	1,000	0,120	0,020	0,146		
	1,411	1,221	1,316	0,113	1,000	0,012	0,020	2,473		
	3,644	3,198	3,421	0,158	1,000	0,022	0,020	1,586		
	6,006	5,464	5,735	0,193	1,000	0,030	0,020	1,275		
HAIES	Etalleville	0,697	0,599	0,658	0,025	0,985	0,027	0,058	0,734	
		1,376	1,150	1,279	0,039	0,988	0,033	0,058	0,810	
		2,588	2,375	2,505	0,054	0,991	0,046	0,058	0,697	
		4,177	4,035	4,131	0,069	0,994	0,060	0,058	0,627	
		6,651	6,643	6,667	0,085	0,997	0,079	0,058	0,536	
		1,897	1,867	1,901	0,050	0,990	0,038	0,058	0,804	
		12,325	12,325	12,301	0,110	1,002	0,113	0,058	0,429	
		Yvecrique	2,101	1,751	1,926	0,051	1,000	0,038	0,028	0,575
			2,778	2,474	2,626	0,064	1,000	0,041	0,028	0,606
			4,015	3,659	3,837	0,080	1,000	0,048	0,028	0,591
5,476	5,235		5,355	0,100	1,000	0,054	0,028	0,600		
Touffreville-la-Câble	1,149	0,991	1,070	0,007	1,000	0,145	0,058	0,062		
	2,321	2,105	2,213	0,026	1,000	0,086	0,058	0,237		
	0,641	0,496	0,568	0,006	1,000	0,097	0,058	0,080		
	3,648	3,455	3,551	0,036	1,000	0,099	0,058	0,251		
	6,736	6,583	6,659	0,060	1,000	0,111	0,058	0,310		
	4,799	4,677	4,738	0,048	1,000	0,098	0,058	0,306		
	3,454	3,090	3,272	0,040	1,000	0,083	0,058	0,322		
	11,229	11,229	11,229	0,092	1,000	0,122	0,058	0,362		

ANNEXE 2 : RÉSULTATS DES MESURES DE SÉDIMENTATION POUR CHAQUE ESSAI

Description				Caracteristiques du sédiment injecté				Caracteristiques hydrauliques					Resultats				Transfert théorique (Dabney)			
Site	Objet	dh (cm)	Alim.	D (mm)	Sol	0-64 μm	64-125 μm	125 μm-2mm	Groupe	Q (l/s/m)	n	V* (m/s)	Vmin (m/s)	L (m)	Ce (g/l)	Durée (s)	Cs max (g/l)	Exp total	Exp max	Passage total (%)
Albl	Fascine	1	c	< 1	1	38,8	35,7	25,4	F1	2,95	0,42	0,057	0,037	2,8	11	123	2,10	17,0%	22,8%	12,0%
Etle	Haie	7	c	< 1	1bis	36,3	32,8	30,8	F1	1,92	0,36	0,044	0,019	2,3	14	136	1,89	9,1%	13,6%	10,4%
										4,10	0,38	0,059	0,031	2,6	27	63	2,80	15,3%	10,3%	19,0%
SGN	Fascine	0	c	< 1	1	33,3	35,1	31,6	F1	2,05	0,50	0,044	0,044	1,8	15	108	2,29	13,1%	15,5%	10,5%
										4,88	0,60	0,055	0,055	2,4	28	72	5,93	21,6%	21,1%	19,0%
TIC	Haie	8	c	< 1	1	39,0	29,6	31,4	F1	3,39	0,32	0,082	0,025	2,5	13	109	2,48	16,6%	35,2%	15,7%
										6,51	0,31	0,110	0,047	2,8	15	105	5,01	26,3%	52,4%	26,0%
Albl	Fascine	1	c	< 2	1	69,2	25,6	5,2	F2	2,95	0,31	0,070	0,042	2,8	13	63	2,50	21,1%	23,0%	21,1%
CB	Fascine	0	m	< 2	2	12,5	15,3	72,2	G2	2,62	1,01	0,028	0,028	3,2	13	111	0,41	1,2%	3,4%	2,6%
						12,4	14,5	73,1		2,62	1,01	0,028	0,028	3,2	21	111	0,73	1,2%	3,4%	2,7%
Yvc	Haie	6	m	< 2	3	19,4	12,1	68,5	G3	1,93	0,59	0,025	0,016	3,3	9	135	0,89	3,4%	6,6%	2,6%
										3,84	0,57	0,036	0,026	3,8	12	141	1,05	6,6%	2,2%	5,6%
SGN	Fascine	0	c	1 à 2	1	18,7	26,7	54,6	G1	2,01	0,41	0,050	0,050	1,2	19	113	1,39	7,0%	7,5%	9,7%
Albl	Fascine	1	c	1 à 2	1	19,7	28,1	54,1	G1	3,04	0,46	0,054	0,038	2,8	15	99	0,70	3,8%	5,3%	6,1%
Etle	Haie	7	c	1 à 2	1bis	-	-	-	G1	1,92	0,36	0,044	0,019	2,3	19	109	0,75	2,8%	4,1%	n.d
TIC	Haie	8	c	1 à 2	1	19,5	26,5	53,9	G1	3,27	0,32	0,082	0,025	2,5	15	93	0,86	4,9%	10,6%	7,6%

dh Différence d'altitude du fond entre le point bas à l'amont de l'objet et ce dernier
 Une valeur positive indique la présence d'un creux devant la haie ou la fascine
 Alim. L'alimentation en eau à la fin du pulse de sédiments est soit coupée (c), soit maintenue (m)
 D Type de tamisage
 Groupe G : P(>125μm) > 50 % ; F : P(>125μm) < 35 %
 n Coefficient de Manning
 V* Vitesse au droit de l'objet étudié
 Vmin Vitesse minimale à l'amont de l'objet

L Distance entre le ressaut hydraulique et la haie ou la fascine
 Ce Concentration de sédiments en entrée
 Durée Durée du pulse de sédiments
 Cs max Concentration instantanée maximale en sortie
 Exp total Masse totale exportée / masse totale apportée
 Exp max Cs max / Ce
 † Données issues des mesures effectuées en eau claire, les débits peuvent différer de 10 à 20 %

ANNEXE 3 : ÉLÉMENTS PRATIQUES DE DIMENSIONNEMENT D'UNE HAIE OU D'UNE FASCINE

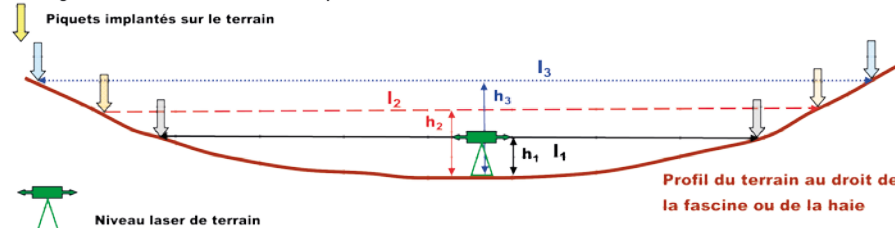
Le bon dimensionnement de la longueur de la fascine ou de la haie par rapport au profil du terrain, et / ou par rapport à la capacité de stockage recherchée, est l'un des éléments clés de son succès.

1 - Proposition d'une méthode pour évaluer la longueur de la fascine nécessaire

Il est proposé de réaliser au minimum une mesure sur le terrain à l'aide d'un simple niveau laser de chantier, selon la méthode présentée dans le schéma ci-dessous (Figure 1). La mesure pour une hauteur de 50 cm est nécessaire car elle correspond généralement à la hauteur utile fonctionnelle de la fascine au cours des prochaines années. Deux mesures supplémentaires peuvent être réalisées :

- ▶ à 30 cm de hauteur, pour examiner la convexité du profil de terrain, et pour choisir ensuite l'une ou l'autre méthode de calcul du volume amont ;
- ▶ à 80 cm de hauteur, pour évaluer à long terme le besoin d'allongement de la fascine si les dépôts sont importants en amont, et que l'on a prévu de pouvoir rehausser la fascine.

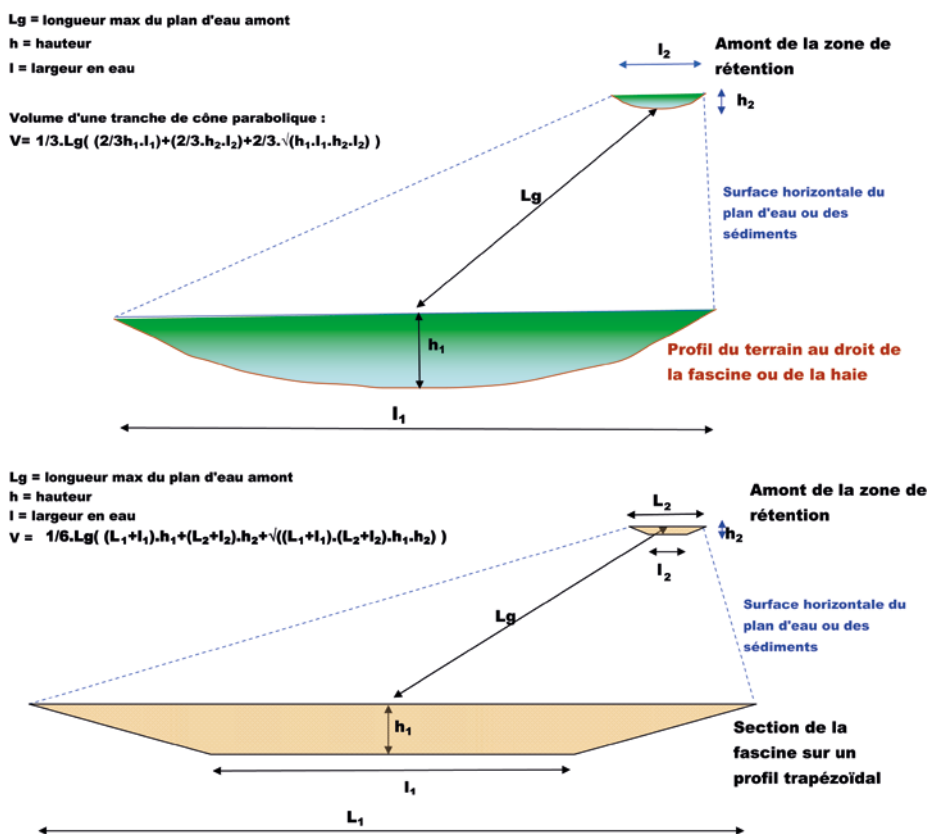
h = hauteur choisie : h2 = 50 cm obligatoire et h1 = 30 cm, h3 = 80 cm
 L = longueur de fascine ou haie nécessaire pour H donné



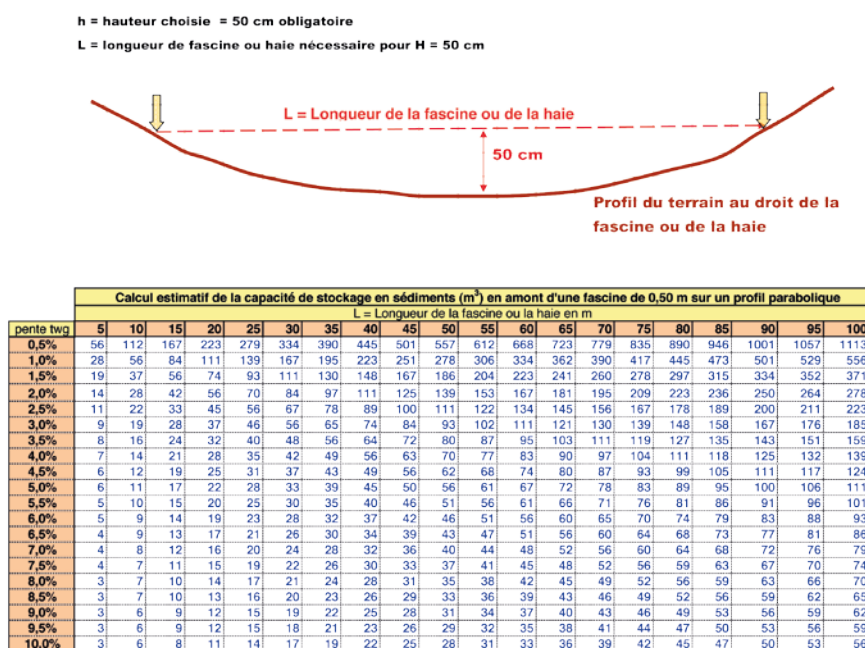
▶ Figure 1 : Exemple de méthode de mesure sur le terrain de la longueur nécessaire de fascine ou de haie avec l'utilisation d'un niveau laser

2 - Proposition de deux méthodes pour évaluer la capacité de stockage des sédiments en amont d'une fascine

Dans le cas d'un talweg ou d'une zone de concentration évasée, il est proposé de s'appuyer sur la formule d'une tranche de cône parabolique (profil de terrain de forme parabolique), ou sur la formule d'une tranche de pyramide (profil de terrain de forme trapézoïdale). Les 2 schémas suivants illustrent les méthodes qui restent simples sous tableur (Figure 2 et Figure 3).



Partant de ces principes simples, le tableau suivant fournit un exemple des ordres de grandeur de cette capacité de stockage maximale pour le cas d'une fascine de 50 cm de hauteur.





Avec un objectif opérationnel très présent, cette étude complète les connaissances sur les conditions d'efficacité des fascines et des haies à plat pour réduire la charge solide des ruissellements en milieu érosif, et pour contribuer au ralentissement dynamique à l'échelle des bassins versants.

Tous les essais ont été réalisés avec des débits spécifiques de 0,5 à 12 l/s/ml. Les capacités d'infiltration mesurées pour des haies très denses à plat sont de l'ordre de 400 mm/h \pm 100 mm/h, et celles des fascines sont de l'ordre de 170 mm/h avec une plus grande variabilité, allant de 35 à 360 mm/h. Le ralentissement dynamique créé par ces obstacles perméables a été examiné par le biais du coefficient de Manning (n). Pour des haies très denses avec plus de 50 tiges par mètre linéaire, les valeurs du coefficient de Manning mesurées vont de 0,4 à 0,8 s/m^{1/3}. Avec une haie de 7 ans ayant moins de 20 tiges par mètre linéaire, les valeurs du coefficient de Manning mesurées vont de 0,06 à 0,08 s/m^{1/3} seulement. Pour les fascines, lorsque la densité de plein (inverse de la porosité) est comprise entre 40 et 45 %, le coefficient de Manning se situe entre 0,5 et 1,0 s/m^{1/3}. Si elles sont plus denses, la valeur du coefficient de Manning varie entre 1,0 et 3 s/m^{1/3}. Si elles sont moins denses, cette valeur est comprise entre 0,3 et 0,5 s/m^{1/3}. Du point de vue de la sédimentation dans cette gamme de débits, les taux d'abattement obtenus en injectant des pulses de particules issues d'un sol limoneux battant tamisé à 1 mm, vont de 74 à 91 % pour les fascines et pour les haies anciennes. Les taux d'abattement les plus élevés sont obtenus pour les plus faibles vitesses d'écoulement. Ces faibles vitesses correspondent aux cas des plus faibles débits, et au cas des pentes les plus faibles en amont. On constate que les conditions de topographie à l'amont des objets influencent beaucoup les résultats. Notamment la présence d'un plateau sédimentaire ou d'une dépression permet de renforcer significativement la sédimentation en ralentissant l'écoulement. Lorsque les particules sont plus grossières (avec un sol tamisé à 2 mm), les taux de sédimentation peuvent atteindre 93 à 99 %.

L'utilisation des équations de DABNEY *et al.* (1995) pour évaluer la part sédimentée de différentes classes granulométriques de particules, permet de reconstituer les taux de sédimentation mesurés. Avec les échantillons de sols limoneux tamisés à 1 mm et les débits testés, le taux de sédimentation est en moyenne de 99,9 % pour les particules de taille supérieure à 125 μ m, de 94 % pour les particules de taille comprise entre 63 et 125 μ m, de 74 % pour les particules de taille comprise entre 32 et 63 μ m, de 47 % pour les particules de taille comprise entre 16 et 32 μ m, et de 36 % pour les particules de taille inférieure 16 μ m.

La localisation des haies et des fascines est donc particulièrement adaptée sur le trajet des écoulements concentrés, situés en tête de bassin versant ou en aval de parcelles érodables, qui engendrent de petits débits avec des charges importantes en éléments grossiers. Afin de rester dans des conditions de débits spécifiques faibles, il convient de chercher à étaler les écoulements en choisissant un site adéquat ou une longueur adaptée. En région, on constate que la mise en place de ces haies et fascines reste acceptable pour les exploitants agricoles, compte tenu des faibles surfaces nécessaires, et de leur localisation fréquente en bordure de parcelle. En outre, ces solutions peuvent contribuer à améliorer la qualité des eaux et à créer un maillage du territoire favorable à la biodiversité.

L'intérêt des associations du type haie + fascine, ou haie + fascine + bande enherbée est démontré pour assurer la durabilité de l'action, et pour conjuguer les effets positifs sur l'infiltration et sur la sédimentation. Dans les régions érosives, le concept "une haie doublée d'une fascine sur le chemin de l'eau à l'échelle de son exploitation" est recommandé, et en fonction des enjeux, il faudra ajouter une bande enherbée ou un chenal enherbé.

www.areas.asso.fr



ASSOCIATION RÉGIONALE POUR L'ÉTUDE ET L'AMÉLIORATION DES SOLS

2, avenue Foch - 76460 ST VALERY EN CAUX

Tél. : 02 35 97 25 12 - FAX : 02 35 97 25 73

contact@areas.asso.fr

