



# Haies herbacées anti-érosives intérêt, faisabilité, efficacité en Haute-Normandie

Bilan des travaux exploratoires menés au cours  
des campagnes 2012 et 2013



**Jean-Baptiste RICHEL, Mathieu SAUNIER, Jean-François OUVRY**

**09/05/2014**

Évaluation de la capacité des haies herbacées à réduire les ruissellements érosifs en zone tempérée océanique : identification des espèces, mesure de l'efficacité, méthodes d'implantation et d'entretien.

Un projet de l'AREAS réalisé  
avec le soutien financier de :





## Résumé

Les haies herbacées sont des bandes étroites de graminées hautes, raides et denses, permettant de ralentir les ruissellements et de favoriser la sédimentation des matières en suspension qu'ils charrient. Elles constituent une zone tampon efficace et largement utilisée dans les régions chaudes du monde, mais aucune référence ne fait état d'usage sous les climats tempérés. Ce travail exploratoire a permis d'évaluer l'intérêt, la faisabilité et l'efficacité des haies herbacées à maîtriser les ruissellements érosifs en Haute-Normandie et plus largement en zone tempérée océanique.

Selon la bibliographie, elles semblent avoir des avantages proches de ceux des haies arbustives et des fascines, tout en présentant des inconvénients moins marqués. Notamment, l'efficacité des haies herbacées semble ne pas diminuer dans le temps, contrairement aux fascines. En outre d'un point de vue économique elles sont d'un coût bien inférieur. Il serait donc intéressant de disposer de haies herbacées pour réduire les ruissellements érosifs sous nos climats.

Sur la base de critères adaptés à partir de la littérature scientifique, des espèces végétales ont été sélectionnées, puis testées à l'aide d'un simulateur de ruissellement, en pleins champs ou en jardinières, afin d'évaluer leur aptitude à servir de haie herbacée. Frein hydraulique, sédimentation et infiltration ont ainsi été évalués sur 2 espèces testées en plein champ, et le frein hydraulique a été évalué pour 12 variétés de 6 espèces en jardinières, pour une gamme de débits représentative des ruissellements concentrés fréquents survenant sur de petits bassins versants du pays de Caux (jusqu'à la vingtenne sur 50 ha).

Les résultats expérimentaux obtenus sur 34 expérimentations se montrent convergents avec ceux de la littérature, et plusieurs espèces présentent des efficacités similaires à celles des bonnes fascines ou des haies arbustives efficaces. Il s'agit, par efficacité décroissante, de *Miscanthus giganteus*, *Carex pendula*, *Festuca mairei*, et *Panicum virgatum*. Le rôle des feuilles mortes et autres fragments végétaux de grande dimension s'est révélé essentiel pour assurer l'efficacité de la haie herbacée, et permet de la maintenir en dehors de la saison végétative. De même l'association d'au moins deux types de végétaux différents semble particulièrement intéressante. La haie herbacée peut donc être efficace au cours des principales périodes à risques de ruissellements en Haute-Normandie que sont l'automne, l'hiver et le début du printemps.

Il est donc possible de mettre en place des haies herbacées anti-érosives en zones tempérées océaniques. Cependant, des investigations complémentaires apparaissent nécessaires pour parvenir à des recommandations techniques précises pour l'implantation et l'entretien de ces haies herbacées.

## Remerciements

L'AREAS tient à remercier les institutions dont le soutien financier a permis la réalisation de ces travaux :

- l'Agence de l'Eau Seine Normandie, direction territoriale et maritime Seine-aval ;
- la Région Haute-Normandie ;
- le Département de la Seine Maritime ;
- le Département de l'Eure.

Deux étudiants ont activement participé à la réalisation de ces travaux, et ont grandement contribué à la qualité des résultats obtenus : Vincent Delamare et Margaux Motte. Qu'ils en soient ici remerciés.

Les auteurs remercient également tous ceux qui ont accepté d'accueillir nos essais sur leurs parcelles. Leur accueil et leur disponibilité ont été des atouts précieux pour le bon déroulement de nos campagnes de terrain :

- M. Durand à Etrépagny,
- M. Verecke à Bourneville,
- M. Vimbert à Etoutteville,
- MM. Dupouy et Bellec et le service des serres municipales de Fécamp,
- le Syndicat de bassin versant de la Durdent.

## Sommaire

Résumé.....	i
Remerciements.....	i
Sommaire.....	ii
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	v
Liste des annexes.....	v
1. Contexte et objectifs.....	1
1.1. Les zones tampons en Haute-Normandie.....	1
1.1.1. Usage des zones tampons en Haute-Normandie.....	1
1.1.2. Avantages et limites.....	2
1.1.3. La haie herbacée, une zone tampon efficace des régions chaudes.....	3
1.2. Les haies herbacées peuvent-elles être adaptées à la Haute-Normandie ?.....	4
1.2.1. Objectif de ces travaux exploratoires : analyser la faisabilité des haies herbacées en Haute-Normandie.....	4
1.2.2. Organisation des travaux.....	5
2. Éléments de bibliographie.....	7
2.1. Principe des haies herbacées.....	7
2.2. Efficacité potentielle des haies herbacées.....	8
2.3. Constitution des haies herbacées.....	9
2.4. Conclusion.....	10
3. Matériel et méthodes.....	11
3.1. Sélection du matériel végétal.....	11
3.1.1. Critères de sélection.....	11
3.1.2. Sélection de variétés.....	13
3.1.3. Sélection d'individus.....	14
3.2. Mesure de l'efficacité des haies herbacées.....	19
3.2.1. Le simulateur de ruissellement.....	19
3.2.2. Mesures hydrauliques.....	21
3.2.3. Gamme des débits testés.....	21
3.2.4. Mesures sédimentaires.....	22
3.2.5. Modélisation.....	23
3.3. Implantation et entretien.....	23
4. Résultats des efficacités mesurées.....	25
4.1. Analyse du frein hydraulique.....	25
4.1.1. Des résultats conformes à la littérature.....	27
4.1.2. Comparaison avec les fascines.....	29
4.1.3. Analyse de la saisonnalité.....	30
4.1.4. Analyse de l'effet des passages préférentiels.....	31
4.1.5. Rôle du mulch.....	32
4.1.6. Intérêt des associations.....	34
4.1.7. Modélisation.....	35
4.2. Critères de sélection des plantes.....	36

4.3. Sédimentation .....	37
4.4. Infiltration .....	38
5. Implantation et entretien.....	39
5.1. Éléments issus de la bibliographie.....	39
5.2. Implantation et entretien .....	39
6. Conclusion et perspectives .....	43
6.1. Faisabilité.....	43
6.2. Perspectives .....	43
Bibliographie .....	45
Annexes.....	47

### Liste des figures

Figure 1 : progression temporelle des zones tampons sous maîtrise d’ouvrage public (zones tampons enherbées, haies et fascines) en Haute-Normandie, relativement au total cumulé atteint en 2013 (source : BD CASTOR (AREAS 2014)).....	1
Figure 2 : principe de la haie herbacée de vétiver contre l’érosion des terres, d’après (Greenfield 1989) .....	3
Figure 3 : volume moyen écoulé par mois et nombre moyen d’événements ruisselants significatifs par mois pour les campagnes de 2002 à 2013 sur le bassin versant de Bourville (Seine-Maritime, environ 10 km <sup>2</sup> ) .....	5
Figure 4 : vue d’un bassin versant pilote de 6 ha pour l’évaluation de la réduction de l’érosion par les haies herbacées dans la région de collines de limons profonds à Treynor, dans l’ouest de l’Iowa, aux États-Unis. Sur cette vue, les haies herbacées sont espacées d’environ 16 m (Alberts, Ghidey, Kramer 2003)......	7
Figure 5 : prise de vue du canal expérimental du NRCS après un essai avec des eaux chargées en sédiments. On distingue les laisses de crues marquant le niveau d’eau, ainsi que les dépôts de sédiments, accumulés principalement à proximité du ressaut hydraulique (tiré de (Meyer, Dabney, Kemper 2001)). .....	8
Figure 6 : coefficients de Manning en fonction du débit par unité de largeur mesuré par l’USDA pour le <i>switchgrass</i> ( <i>Panicum virgatum</i> ) et le vétiver (Dabney et al. 1995), et par l’AREAS pour les fascines et les haies arbustives (Ouvry et al. 2012). .....	8
Figure 7 : évolution de la topographie à Treynor entre 1993 et 1996, en mètres. Les valeurs positives correspondent aux dépôts, les zones érodées ont des valeurs négatives. Tiré de (Dabney et al. 1999). .....	9
Figure 8 : selon l’USDA, la zone hachurée en vert regroupe les couples (diamètre de tiges, densité de tiges) des couverts herbacés aptes à ralentir un ruissellement diffus ( $VSI \geq 0,05 \text{ in}^4/\text{ft}^2$ ), et la zone hachurée en rouge ceux des couverts herbacés aptes à ralentir un ruissellement concentré ( $VSI \geq 0,1 \text{ in}^4/\text{ft}^2$ )......	10
Figure 9 : diamètre moyen des tiges et densité des tiges sur les diverses situations testées, en regard des courbes de différentes valeurs de VSI. ....	12
Figure 10 : zones de rusticité en Europe de l’ouest (Kelley 1999) .....	13
Figure 11 : le champ de <i>Miscanthus giganteus</i> de Etoutteville et la touffe sélectionnée en son sein pour effectuer les mesures d’efficacité .....	16
Figure 12 : mise en jardinière de quelques espèces sélectionnées (en haut), et installation de ces individus en pleine terre après les essais de ruissellement (en bas).....	18
Figure 13 : Schéma des pièces du simulateur de ruissellement permettant la circulation de l’eau autour de l’objet testé .....	19
Figure 14 : vue verticale de la « surface naturelle testée » (panic érigé à Etrepagny en 2013).....	20

Figure 15 : Dispositif complet du simulateur de ruissellement vu depuis l'aval (installé sur une fascine à Saint-Gilles-de-la-Neuville) .....	20
Figure 16 : Lecture de la hauteur d'eau tous les 20 cm sur une entretoise .....	21
Figure 17 : Le canal de mesure installé pour travailler sur des jardinières, vue des entretoises et des bâches.....	21
Figure 18 : Apport des sédiments et homogénéisation dans le flux.....	22
Figure 19 : frein hydraulique en fonction des débits par unité de largeur pour l'ensemble des objets testés .....	25
Figure 20 : coefficients de Manning normalisés des différents essais réalisés .....	27
Figure 21 : coefficients de Manning en fonction du débit par unité de largeur pour des objets présentant les plus forts freins hydrauliques par rapport aux résultats obtenus par (Dabney et al. 1995) (Ouvry et al. 2012)(\$ : résultats de Dabney et al. ; mis : <i>Miscanthus giganteus</i> ; swi : panic érigé sauvage ; kan : panic érigé kanlow ; fes : fétuque élevée ; vet : vétiver ; s&r : panic érigé et résidus ; s&f : association panic érigé et fétuque élevée ; le nombre à trois chiffres désigne la largeur de la haie en millimètres – dans le sens de l'écoulement) .....	28
Figure 22 : coefficients de Manning en fonction du débit par unité de largeur pour des objets présentant les plus forts freins hydrauliques par rapport aux gammes d'efficacité des fascines mesurées par (Ouvry et al. 2012) .....	29
Figure 23 : frein hydraulique en fonction du débit par unité de largeur et de la saison pour les <i>Miscanthus giganteus</i> de plein champ ((E) : mesures d'été, en pleine végétation ; (H) : mesures en fin d'hiver, sur la production de l'été précédent) .....	30
Figure 24 : frein hydraulique en fonction du débit par unité de largeur et de la saison pour les panics érigés de plein champ ((E) : mesures d'été, en pleine végétation ; (H) : mesures en fin d'hiver, sur la production de l'été précédent) .....	30
Figure 25 : la touffe de <i>Miscanthus giganteus</i> à Etoutteville avec une trouée de 23 cm, soit 33 % de la largeur du canal (prise de vue de l'amont vers l'aval). .....	31
Figure 26 : frein hydraulique en fonction du débit par unité de largeur pour différentes tailles de trouées en travers de la touffe de <i>Miscanthus giganteus</i> à Etoutteville. ....	31
Figure 27 : frein hydraulique en fonction de la taille de la trouée pour différents débits .....	32
Figure 28 : diminution relative du frein hydraulique en fonction de la taille de la trouée pour différents débits .....	32
Figure 29 : la touffe à Etrépagny (mars 2014), situation naturelle initiale avec mulch à gauche, et après avoir retiré le mulch à droite.....	32
Figure 30 : frein hydraulique en fonction du débit par unité de largeur pour deux objets avec ou sans mulch (Etrépagny 2014).....	33
Figure 31 : le couple <i>Festuca mairei</i> -- <i>Miscanthus sinensis roland</i> en place dans le canal du simulateur de ruissellement (l'amont est à gauche). .....	34
Figure 32 : frein hydraulique en fonction du débit par unité de largeur pour deux objets et leur association .....	34
Figure 33 : modélisation de la ligne d'eau avec HEC-RAS, à partir de la topographie et de la rugosité hydraulique, cas du <i>M. giganteus</i> étudié à Etoutteville en 2013.....	35
Figure 34 : coefficients de Manning déduits de nos mesures de terrain, en rouge, et issus du calage à l'aide de HEC-RAS, pour le <i>M. giganteus</i> étudié à Etoutteville en 2013.....	35
Figure 35 : coefficients de Manning normalisés en fonction du VSI.....	36
Figure 36 : exports de sédiments mesurés et estimés par la relation de Dabney et al. pour les <i>Miscanthus</i> (à gauche) et les panics érigés (à droite), selon la granulométrie des sédiments et la gamme des débits .....	37
Figure 37 : infiltrations mesurées à 1 l/s/m .....	38

Figure 38 : infiltrations à saturation mesurées dans le cadre du projet <i>bandes ligno-cellulosiques</i> de la Chambre d’agriculture de Seine-Maritime en 2013 ; valeurs minimales, moyennes et maximales pour l’ensemble des mesures effectuées à un débit inférieur à 2 l/s/m. ....	38
Figure 39 : un bout de champ sur la commune de Bittschoffen (67) planté en miscanthus en 2011, lors de notre visite en juin 2013 – les dépôts de sédiments sont visibles devant la personne. ....	40
Figure 40 : une bande de miscanthus à vocation anti-érosive stricte, les tiges sèches des saisons précédentes sont encore en place.....	40
Figure 41 : rhizome sub-vertical dans une zone de dépôts .....	40

### **Liste des tableaux**

Tableau 1 : avantages et limites des fascines et des haies arbustives sur la réduction des transferts de MES (Ouvry et al. 2012). ....	2
Tableau 2 : synthèse des avantages et limites des différentes sources de matériel végétal utilisées.....	14
Tableau 3 : principales caractéristiques des essais réalisés en plein champ .....	15
Tableau 4 : principales caractéristiques des essais réalisés en jardinières .....	17
Tableau 5 : évaluation des débits de pointe par unité de largeur arrivant dans un thalweg en fonction de la surface du bassin versant amont et de la largeur du passage d’eau, supposé horizontal, à partir des fréquences de retour des débits de pointe estimés à Bourville, bassin versant rural de 1045 ha en pays de Caux, en appliquant la méthode <i>crupedix</i> ....	22
Tableau 6 : synthèse des essais réalisés .....	26

### **Liste des annexes**

Annexe 1 : Caractéristiques des herbacées semblant pouvoir être utilisées en haie de par leur aspect visuel (les cases colorées indiquent une non-conformité aux critères de sélection, décrits à la section 3.1.2 page 13.). ....	48
Annexe 2 : Caractéristiques des bambous semblant pouvoir être utilisés en haie de par leur aspect visuel (les cases colorées indiquent une non-conformité aux critères de sélection, décrit à la section 3.1.2 page 13.). ....	53
Annexe 3 : Description des plantes en mottes acquises auprès de la pépinière <i>l’autre jardin</i> telle que trouvée dans leur catalogue en ligne (Lagun-Bouchet 2013).....	54



# 1. Contexte et objectifs

## 1.1. Les zones tampons en Haute-Normandie

Beaucoup d'efforts techniques, financiers et humains sont mis en œuvre en Haute-Normandie pour favoriser le développement des zones tampons, dans le but de réduire les impacts des ruissellements et des coulées de boues, qui constituent des enjeux omniprésents.

### 1.1.1. Usage des zones tampons en Haute-Normandie

Les techniciens et les agriculteurs mettent en avant les zones tampons qui sont implantées au plus près des zones productrices de ruissellement et d'érosion comme les bouts de champs enherbés, les fascines et les haies. Parmi celles-ci, les dispositifs qui ont les emprises les plus faibles sont plébiscités : les fascines et les haies arbustives, comme le montre la Figure 1.

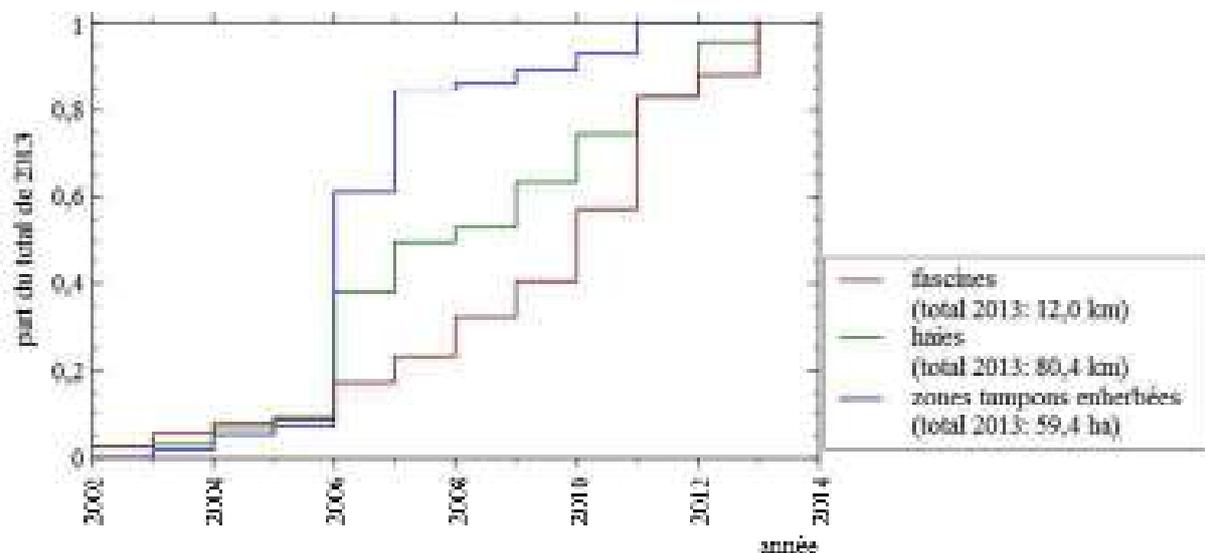


Figure 1 : progression temporelle des zones tampons sous maîtrise d'ouvrage public (zones tampons enherbés, haies et fascines) en Haute-Normandie, relativement au total cumulé atteint en 2013 (source : BD CASTOR (AREAS 2014))

Cette figure montre que la progression des zones tampons a été faible avant 2006. Entre 2006 et 2007, les zones tampons enherbées ont le plus progressé car leur efficacité était bien connue et soutenue par les pouvoirs publics. Puis, à partir de 2008, la progression de cette mesure a été du même ordre que celle qui prévalait avant 2006. En revanche, à partir de

2006, les haies hydrauliques et les fascines connaissent une progression régulière et significative sur le territoire haut-normand bien supérieure à la période précédente.

### 1.1.2. Avantages et limites

L'intérêt des fascines et des haies arbustives hyperdenses a été étudié au cours des années 2008 à 2011. Leur efficacité a été quantifiée, et des préconisations ont été formulées sur leur constitution et leur localisation pour optimiser leur efficacité (Ouvry, et al., 2012). Le Tableau 1 résume leurs avantages et limites sur la réduction des transferts de MES.

**Tableau 1 : avantages et limites des fascines et des haies arbustives sur la réduction des transferts de MES (Ouvry et al. 2012).**

Aménagement	Avantages	Limites
Fascine	<b>Efficacité immédiate</b> <b>Efficacité très élevée</b>  Faible emprise	<b>Faible durée de vie</b> (7 ans max) L'efficacité décroît avec l'accumulation des sédiments (saturation possible en un seul ruissellement) <b>Coût élevé</b> de la mise en place (>50 €/ml) et de l'entretien
Haie arbustive hyperdense	<b>Bonne efficacité à terme</b> Efficacité durable Faible emprise Refuge pour la biodiversité	<b>Temps de mise en place très long</b> (~ 15 ans)  Entretien
Association de fascine, de haie hyperdense et de bande enherbée	<b>Efficacité immédiate</b> <b>Efficacité très élevée</b> <b>Efficacité durable</b>  Faible emprise en comparaison d'une bande enherbée	<b>Coût élevé</b> de la mise en place et de l'entretien  Emprise plus importante que celle de l'un des éléments de l'association

Malgré leur coût, les fascines sont souvent choisies pour apporter une solution immédiate à des problèmes aigus d'érosion. Mais la gestion à moyen terme de ces aménagements pose question. Que faire lorsque la capacité de stockage de sédiments d'une fascine est atteinte ? Au bout de 7 ans, qui viendra les reconstituer et les financer ?

Par endroits, le curage a été tenté pour retrouver la capacité de stockage de sédiments de la fascine. Mais, les fagots restant colmatés par les sédiments, cela conduit à la formation de « mouillères », et soit la fascine surverse, soit elle est débordée sur le côté. Cela ne correspond plus au fonctionnement souhaité.

Il a également été proposé de rehausser les fagots afin de créer une nouvelle capacité de sédimentation. Cela conduit à la formation d'une marche entre l'amont et l'aval de la fascine, qui se traduira par une chute d'eau en cas de surverse, risquant de causer un affouillement de la fascine, pouvant conduire à la formation d'une ravine par érosion régressive sous la fascine dans les dépôts accumulés en amont de celle-ci.

### 1.1.3. La haie herbacée, une zone tampon efficace des régions chaudes

D'autres types de zones tampons sont utilisées ailleurs dans le monde. Les régions chaudes (subtropicales et intertropicales) disposent de végétaux herbacés suffisamment robustes et denses pour jouer un rôle analogue à celui des haies arbustives développées ou des fascines sous nos latitudes. La banque mondiale encourage les haies herbacées à base de vétiver depuis la fin des années 1980, en tant que système végétatif peu onéreux et efficace pour la conservation des sols (The World Bank 1990). Leur plantation est préconisée en bandes parallèles suivant approximativement les isolignes, mais elles peuvent aussi être utilisées en travers des passages d'eau pour ralentir l'écoulement.

Comme avec une fascine ou une haie hyperdense, la haie herbacée forme une barrière semi-perméable à l'eau. Elle ralentit les écoulements, sans les dévier, ce qui provoque la sédimentation d'une partie des terres arrachées par l'érosion à l'amont. Ainsi, elle induit la formation d'une terrasse (Figure 2).

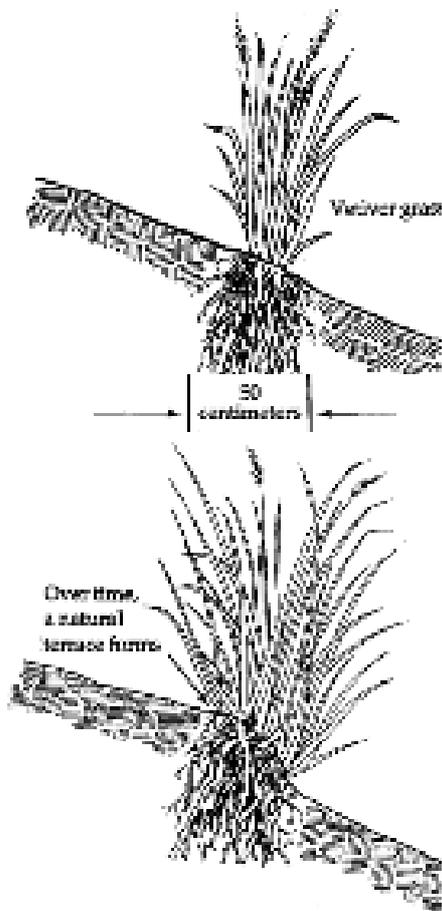


Figure 2 : principe de la haie herbacée de vétiver contre l'érosion des terres, d'après (Greenfield 1989)

La plante stabilise ces dépôts par le développement de son système racinaire. La pente devenant plus faible à l'amont de la haie, l'érodibilité de la zone diminue et la capacité à sédimenter croît. En favorisant l'infiltration, la haie améliore l'utilisation des pluies ou de l'irrigation.

L'efficacité optimale peut être obtenue au bout de deux à trois saisons végétatives. Au-delà de trois ans, la haie herbacée étant pérenne, son efficacité est permanente.

Le vétiver semble bien adapté aux climats d'Afrique, d'Asie, d'Océanie et d'Amérique centrale et du sud, même si des espèces avec de meilleures capacités fourragères peuvent être préférées. Le vétiver est réputé incapable de pousser aux latitudes tempérées. Aux États-Unis d'Amérique, un important travail de développement a été mené par le département d'État à l'agriculture dans les années 1990 autour des haies herbacées, qui l'a conduit à recommander l'usage du panic érigé (*Panicum Virgatum*, ou *switchgrass* pour le nom commun américain) ou du *eastern gamagrass* (*Tripsacum dactyloides*). Le *Miscanthus giganteus* a parfois été utilisé également.

## **1.2. Les haies herbacées peuvent-elles être adaptées à la Haute-Normandie ?**

De par le monde, la haie herbacée constitue une zone tampon qui, si elle devient dense, sera efficace contre les ruissellements érosifs diffus ou concentrés, et **dont l'efficacité ne décroît pas avec le temps.**

Elle semble donc avoir des avantages proches de ceux des haies arbustives et des fascines, tout en présentant des inconvénients moins marqués. Il serait donc intéressant de pouvoir disposer de ce type de zones tampons en Haute-Normandie et au-delà sous les climats océaniques tempérés.

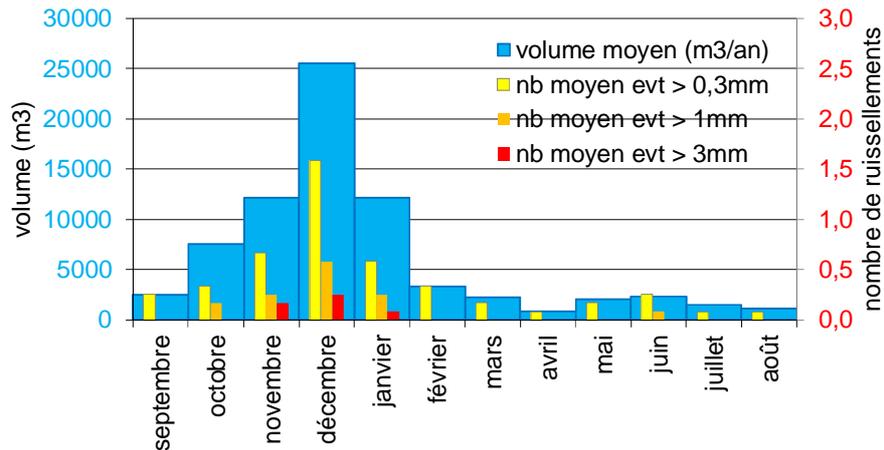
### **1.2.1. Objectif de ces travaux exploratoires : analyser la faisabilité des haies herbacées en Haute-Normandie**

Ce travail a consisté à examiner les possibilités d'adaptation de cette technique antiérosive au climat océanique tempéré en général et à la Région en particulier. Concrètement, il s'agit d'un premier travail exploratoire de faisabilité, jamais réalisé sous ce type de conditions pédo-climatiques. Si la faisabilité est démontrée, une seconde phase sera conduite dans les prochaines années.

**L'analyse de la faisabilité a été basée sur les trois axes de recherche suivants, qui constituent en quelque sorte le cahier des charges de ce programme :**

1. Identifier les espèces :
  - a. capables de se développer dans le contexte pédo-climatique des régions érosives du nord de la France ;
  - b. efficaces tant **en hiver** qu'au printemps ;
  - c. présentant une efficacité sur la réduction des transferts de particules, aussi élevée que celle des fascines ;
  - d. à même de coloniser et maintenir les dépôts de sédiments, afin de restaurer l'efficacité du dispositif et d'éviter l'apparition de nouvelles formes d'érosion dans ces dépôts ;
  - e. sans risque pour les systèmes agricoles et l'environnement.
2. Évaluer l'efficacité des espèces végétales capables de constituer des haies herbacées en termes de frein hydraulique, sédimentation et infiltration.
3. Identifier les conditions d'implantation et d'entretien pour une efficacité durable.

En effet, le climat de la Haute-Normandie, sous lequel doivent se développer les plantes, est très différent de celui des régions tropicales d'où ces techniques sont issues. Les ruissellements auxquels elles seront soumises présentent une différence notable : il ne s'agit pas uniquement de ruissellements d'orages de printemps mais également de ruissellements d'automne et d'hiver, survenant donc en dehors de la période végétative. Les enregistrements de la station de Bourville (Figure 3) donnent une bonne idée de la saisonnalité des écoulements en pays de Caux.



**Figure 3 : volume moyen écoulé par mois et nombre moyen d'événements ruisselants significatifs par mois pour les campagnes de 2002 à 2013 sur le bassin versant de Bourville (Seine-Maritime, environ 10 km<sup>2</sup>)**

Par ailleurs, cette nouvelle technique est susceptible d'introduire l'usage de plantes exotiques dans les écosystèmes agricoles. L'innocuité de ces plantes sur les équilibres écosystémiques et agricoles devra être vérifiée avant la diffusion de toute nouvelle pratique.

### 1.2.2. Organisation des travaux

Dans le cadre des premières recherches sur ce sujet dans le nord de la France, voire de l'Europe, nous avons procédé en trois temps :

1. Une analyse de la bibliographie disponible sur ce sujet, qui a déjà été étudié de façon approfondie pour des régions plus chaudes que la nôtre, afin de disposer des expériences méthodologiques et des références déjà diffusées ;
2. La sélection des différentes espèces végétales qui ont servi à analyser la faisabilité de cette technique dans notre région, en plein champ ou en jardinières ;
3. La réalisation des premières expérimentations sur les espèces sélectionnées permettant d'évaluer l'efficacité potentielle des haies herbacées en Haute-Normandie.

Le présent rapport reprend ces trois parties pour exposer nos résultats, et permet de conclure sur la faisabilité des haies herbacées en climat océanique tempéré, et de jeter les bases d'une suite possible.



## 2. Éléments de bibliographie



Figure 4 : vue d'un bassin versant pilote de 6 ha pour l'évaluation de la réduction de l'érosion par les haies herbacées dans la région de collines de limons profonds à Treynor, dans l'ouest de l'Iowa, aux États-Unis. Sur cette vue, les haies herbacées sont espacées d'environ 16 m (Alberts, Ghidey, Kramer 2003).

### 2.1. Principe des haies herbacées

Dans la littérature, la haie herbacée est toujours une bande étroite semée ou plantée d'une seule espèce offrant un port raide et élevé, et une forte densité végétale pour ralentir les écoulements. Cette bande est installée de façon à offrir la plus grande résistance aux écoulements, c'est-à-dire perpendiculairement à la ligne de plus grande pente.

L'utilisation la plus répandue des haies herbacées est en bandes parallèles étroites mais continues, suivant approximativement les isolignes, comme l'illustre la Figure 4, c'est la *culture en bandes en courbe de niveau, isolées par des bandes d'arrêt enherbées* (Roose, Food and Agriculture Organization of the United Nations 1994). Le principal objectif est la lutte contre le ruissellement diffus et l'érosion associée. Cependant, ce type d'installation amène les haies herbacées à être implantées également en travers des axes de thalwegs, et donc à subir des ruissellements concentrés.

Le ralentissement causé par la haie herbacée, surtout dans les thalwegs, provoque la formation d'une zone d'eau calme à l'amont immédiat de celle-ci, dont la surface est horizontale (zone appelée *backwater* dans la littérature de langue anglaise, visible sur la Figure 5). L'essentiel de la sédimentation a lieu dès l'entrée des écoulements dans cette zone d'eau calme, c'est-à-dire immédiatement après le ressaut hydraulique.



Figure 5 : prise de vue du canal expérimental du NRCS après un essai avec des eaux chargées en sédiments. On distingue les laisses de crues marquant le niveau d'eau, ainsi que les dépôts de sédiments, accumulés principalement à proximité du ressaut hydraulique (tiré de (Meyer, Dabney, Kemper 2001)).

## 2.2. Efficacité potentielle des haies herbacées

Les dernières données scientifiques sur l'efficacité des haies herbacées face à des ruissellements concentrés émanent du *national resources conservation service*, service au sein de l'administration fédérale de l'agriculture aux États-Unis. Elles ont été produites par Seth Dabney et son équipe, depuis le début des années 1990 (on peut notamment citer (Dabney et al. 1995), (Meyer, Dabney, Harmon 1995), (Dunn, Dabney 1996), (Alberts et al. 2001), (Dabney et al. 2004), (Dabney, Vieira, Yoder 2013)). Quelques travaux australiens produits à l'université de Griffith sur le vétiver viennent conforter ces résultats (par exemple (Hussein et al. 2007)).

Des mesures de frein hydraulique ont été réalisées sur quelques décimètres de large, notamment par (Dabney et al. 1995). Ces résultats peuvent être facilement comparés aux freins hydrauliques mesurés sur les aménagements d'hydraulique douce utilisés en Normandie, comme le montre la Figure 6. Pour la gamme des débits par unité de largeur sur laquelle ces résultats peuvent être comparés, on voit que les haies de vétiver ou de panic érigé testées au sud des États-Unis ont une efficacité similaire à celle des meilleures fascines et haies arbustives.

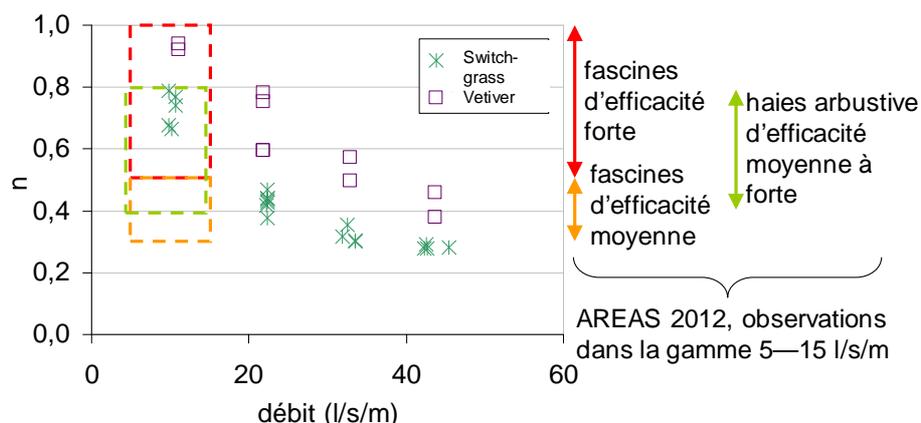


Figure 6 : coefficients de Manning en fonction du débit par unité de largeur mesuré par l'USDA pour le *switchgrass* (*Panicum virgatum*) et le vétiver (Dabney et al. 1995), et par l'AREAS pour les fascines et les haies arbustives (Ouvry et al. 2012).

Ces résultats sont obtenus avec des emprises au sol comparables, voire légèrement inférieures pour les haies herbacées de cette étude. Les freins hydrauliques étant similaires, les

capacités à faire sédimenter les ruissellements le seront aussi, comme l'ont montré (Ouvry et al. 2012). En terme de sédimentation, les avantages et les limites des haies herbacées sont donc les mêmes que ceux des fascines : l'efficacité étant bien supérieure sur les particules grossières que sur les particules fines, ces dispositifs auront un meilleur effet sur la sédimentation lorsqu'ils sont installés à proximité immédiate des sources d'érosion.

L'implantation des haies herbacées induit une évolution de la topographie de la parcelle (Figure 7), comme l'ont montré (Dabney et al. 1999). Cette évolution est due à la fois à l'érosion et aux opérations de travail du sol, notamment le labour. L'effet de cette évolution sur l'érosion à l'échelle d'une parcelle entière est discuté dans (Vieira, Dabney 2012).

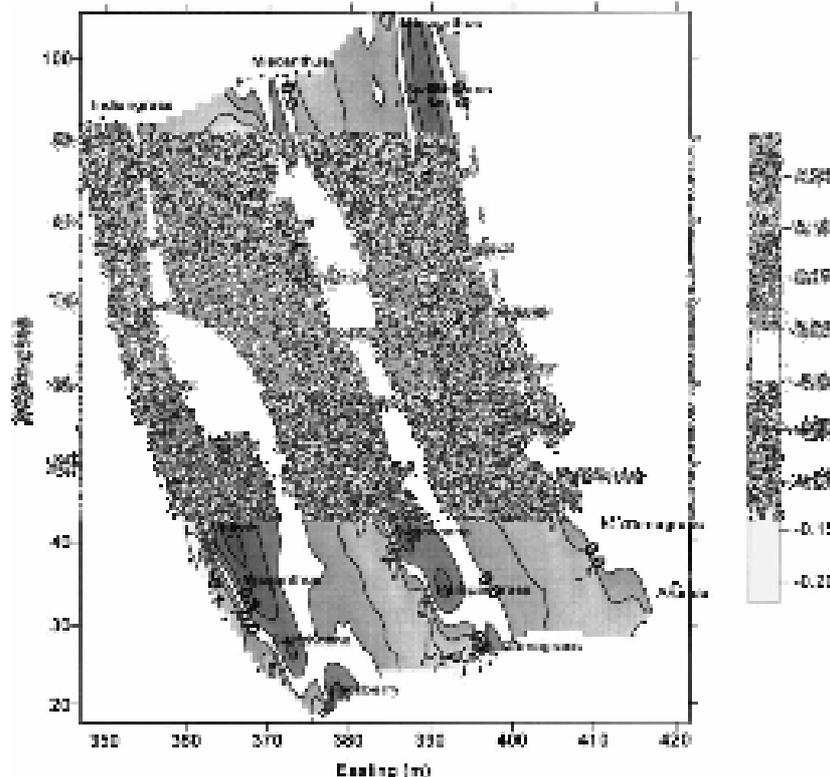


Figure 7 : évolution de la topographie à Treynor entre 1993 et 1996, en mètres. Les valeurs positives correspondent aux dépôts, les zones érodées ont des valeurs négatives. Tiré de (Dabney et al. 1999).

### 2.3. Constitution des haies herbacées

Les informations les plus utiles viennent à nouveau des États-Unis. Dans le principe général, il convient de choisir des plantes au port raide et érigé, présentant une forte densité végétale. Le choix des plantes dépendant des conditions pédo-climatiques, une synthèse des critères qu'elles doivent réunir pour pouvoir constituer des haies herbacées a été produite par le NRCS (NRCS 2010), connue comme le *standard 601*.

Basée sur des études des propriétés biomécaniques des plantes (notamment (Dunn, Dabney 1996)), et des études de cas pratiques, cette note précise les qualités que doivent réunir les plantes à retenir, les dimensions des haies, les densités initiales, et leur conduite au cours des premières années.

En ce qui concerne le choix des plantes, le premier critère mis en avant est le *vegetative stiffness index* (VSI), qui est une simplification du MEI de Dunn et Dabney :

$$VSI = \rho \cdot d^4$$

avec :  $\rho$  = la densité de tiges (nombre de tiges par pied carré)

$d$  = le diamètre moyen des tiges en pouces.

C'est une mesure non destructive et aisément déterminable (un pied à coulisse et une règle suffisent).

Selon le *standard 601*, la haie herbacée doit atteindre un VSI d'au moins :

0,05  $\text{in}^4/\text{ft}^2$  dans le cas d'une haie soumise uniquement à des ruissellements diffus, et

0,1  $\text{in}^4/\text{ft}^2$  dans le cas d'une haie soumise à des ruissellements concentrés.

Ce critère, représenté sur la Figure 8, est sensé assurer la capacité de la haie à ralentir suffisamment l'écoulement et à ne pas rompre sous la pression du flot.

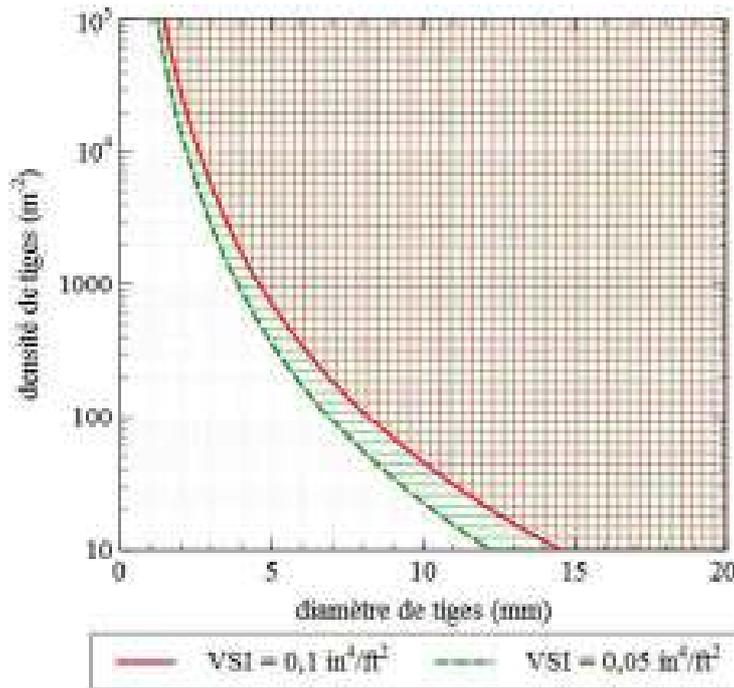


Figure 8 : selon l'USDA, la zone hachurée en vert regroupe les couples (diamètre de tiges, densité de tiges) des couverts herbacés aptes à ralentir un ruissellement diffus ( $VSI \geq 0,05 \text{ in}^4/\text{ft}^2$ ), et la zone hachurée en rouge ceux des couverts herbacés aptes à ralentir un ruissellement concentré ( $VSI \geq 0,1 \text{ in}^4/\text{ft}^2$ ).

## 2.4. Conclusion

La technique de la haie herbacée est une technique connue, reconnue pour son efficacité, largement utilisée sous climat chaud avec des pluies intenses en période de fort développement végétal. Elle a été bien étudiée, et reste un sujet de recherche, notamment aux États-Unis. Une littérature scientifique fournie aborde tous les aspects : implantation, conduite, efficacité à l'échelle du mètre carré et à l'échelle de la parcelle à moyen terme, choix du matériel végétal, etc. Cependant, aucun usage rapporté dans la littérature ne porte sur la lutte contre les ruissellements d'automne et d'hiver, ni sur des implantations en milieu océanique tempéré.

## 3. Matériel et méthodes

### 3.1. Sélection du matériel végétal

Comme vu précédemment, aucune expérience n'a pu être identifiée dans la littérature en provenance d'un secteur au climat comparable à celui de la Normandie.

Déterminer la ou les espèces permettant de constituer une haie herbacée efficace au printemps **comme en hiver** est le principal enjeu de cette étude.

#### 3.1.1. Critères de sélection

Les plantes doivent satisfaire un ensemble de critères :

Les critères d'ordre morphologique doivent permettre à la haie de remplir son rôle de frein hydraulique quelle que soit la saison à laquelle elle est sollicitée par des ruissellements.

Les critères végétatifs doivent permettre une implantation réussie et une efficacité durable dans le temps, sans nuire à l'environnement proche ou lointain.

##### 3.1.1.1. Critères morphologiques

- a. **Frein hydraulique** : la haie doit présenter un frein hydraulique comparable à celui des fascines ou des haies arbustives bien établies, lorsque soumise à un débit par unité de largeur représentatif des écoulements concentrés ;
- b. **Rigidité de la haie** : la densité de tiges et le diamètre des tiges doivent assurer une bonne rigidité de l'ensemble de la haie, et supporter le passage d'un écoulement concentré sans rompre ;
- c. Plantes dont **les tiges restent érigées** tout au long de l'année ;
- d. **Tiges assez hautes** pour ne pas être submergées.

Pour évaluer le frein hydraulique, c'est-à-dire la capacité des plantes à ralentir les écoulements en situation de ruissellement concentré, le coefficient de Manning-Stricker a été retenu. Étant donné les capacités des zones tampons déjà en usage dans la région (Figure 6), il a été décidé de retenir les deux valeurs suivantes comme repères : de façon idéale, la haie herbacée devrait offrir un coefficient de Manning supérieur à  $0,5 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ . La valeur de  $0,3 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$  constitue le seuil minimum en deçà duquel l'espèce végétale sera jugée non la pertinente et de ce fait non retenue, car les dispositifs enherbés classiques permettent d'atteindre ces valeurs.

En ce qui concerne la rigidité de la haie, nous disposons de la valeur proposée par le NRCS :  $VSI = 0,1 \text{ in}^4/\text{ft}^2$  ; soit  $= 4,48 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4/\text{m}^2$ , paramètre dont la détermination est bien plus aisée que la mesure du frein hydraulique. La Figure 9 montre la diversité des couples (diamètre de tiges, densité de tiges) qui a été testée au cours de ces travaux. Le lien entre la rigidité de la haie herbacée, assimilée à son VSI, d'une part, et son frein hydraulique d'autre part, sera discuté.

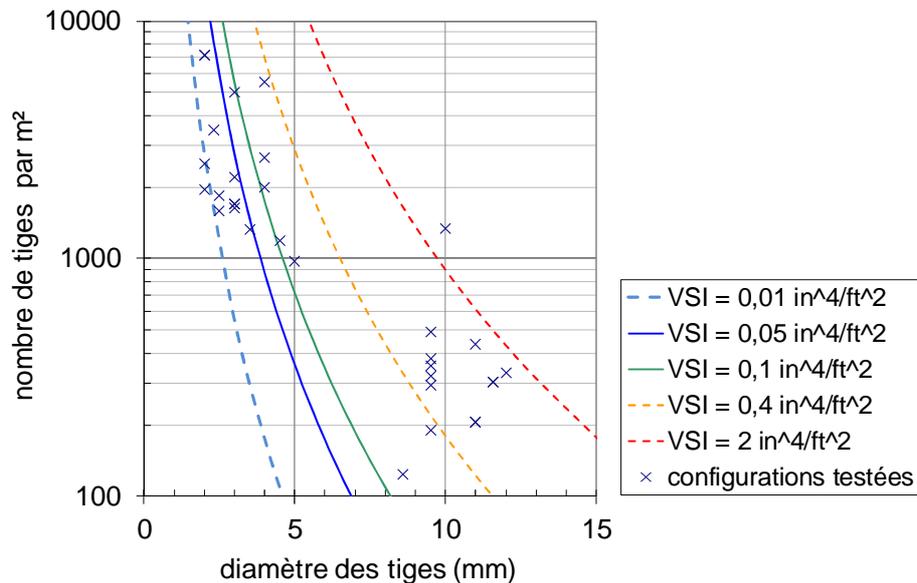


Figure 9 : diamètre moyen des tiges et densité des tiges sur les diverses situations testées, en regard des courbes de différentes valeurs de VSI.

### 3.1.1.2. Critères végétatifs

- a. Plante adaptée aux conditions pédo-climatiques des zones à protéger ;
- b. Implantation et entretien aisés ;
- c. Plante pérenne ;
- d. Plante non invasive, ni par reproduction végétative (plantes traçantes), ni par reproduction sexuée (graines fertiles et résistantes aux itinéraires techniques de désherbage conventionnels) ;
- e. Capable d'émerger à travers plusieurs centimètres de dépôts sédimentaires ;
- f. Capable de bouturer : les organes se retrouvant enfouis dans les sédiments peuvent amorcer de nouvelles racines ou de nouvelles tiges ;
- g. Apte à supporter un sol humide voire saturé pendant plusieurs semaines en hiver ;
- h. Si possible, peu sensible aux herbicides habituellement utilisés dans la parcelle.

### 3.1.1.3. Conséquences

D'après les critères énoncés ci-dessus, les plantes à rhizomes ou à stolons seront préférées, tout en évitant les plantes traçantes.

Dans le cadre d'une haie mono-spécifique, l'ensemble des critères devra être satisfait par la plante sélectionnée. En cas de haie composée de plusieurs espèces, l'ensemble des critères morphologiques devra être rempli par différentes espèces.

### 3.1.2. Sélection de variétés

Un premier recensement d'espèces et de variétés pouvant répondre à nos besoins a été réalisé sur la base des informations disponibles en ligne, principalement en compulsant les catalogues de pépiniéristes. La plupart de ces sites proposent une description du port de la plante, de sa taille, de la largeur des feuilles, du type de sol adéquat, du type racinaire, et de la rusticité de la plante. Les photos illustrant les variétés décrites permettent souvent de se rendre compte de l'allure des individus après plusieurs années de développement en massif avec un entretien régulier.

Les plantes qui pourront servir de haie herbacée devraient figurer parmi celles regroupant l'ensemble des critères suivants :

- hauteur supérieure à 0,5 m ;
- port dressé ou en touffe ;
- tiges raides ;
- système racinaire non traçant ou facilement contenu ;
- port hivernal dressé ;
- sur sol drainé,
- tolérance de sol humide ;
- résistance au froid : zone de rusticité 8 ou inférieure (Figure 10)<sup>1</sup>.

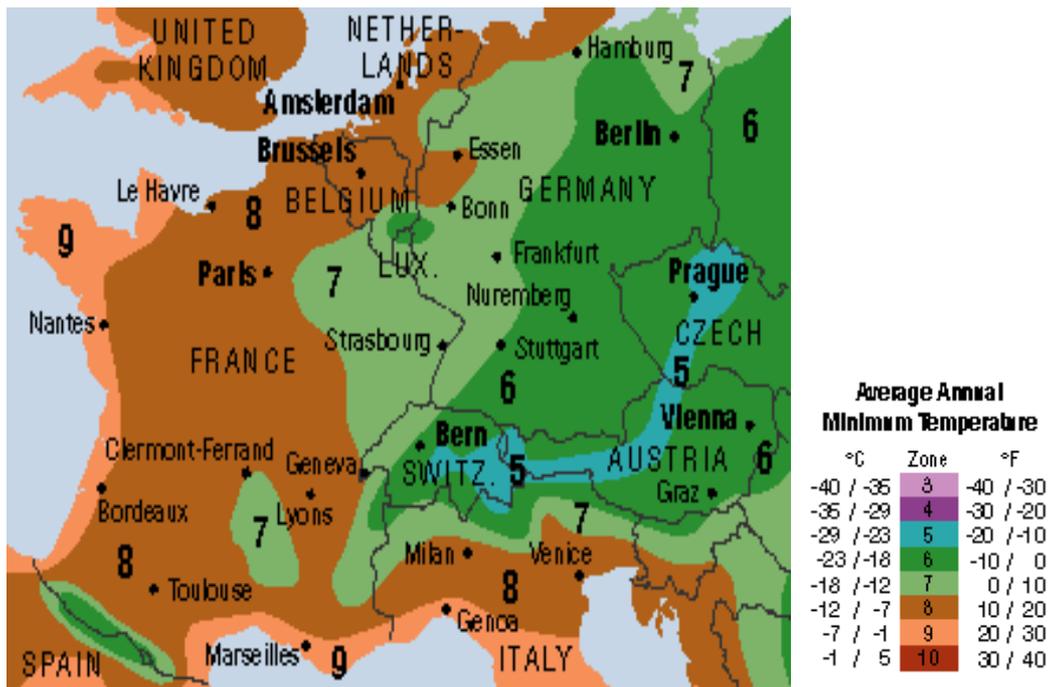


Figure 10 : zones de rusticité en Europe de l'ouest (Kelley 1999)

Ces sources d'informations présentent plusieurs limites : elles ne permettent pas de connaître le port des plantes en hiver, ni de connaître leur comportement hydraulique, les plantes sauvages sans intérêt ornemental ne sont pas décrites. Par nature, ce travail n'est donc pas exhaustif.

<sup>1</sup> Lors du choix d'espèces et de variétés, un paramètre essentiel est la résistance aux températures froides au cours de l'hiver, qualité généralement désignée par le terme *rusticité*. Pour décrire ce caractère, un zonage défini par l'USDA est fréquemment utilisé par les horticulteurs pour qualifier la rusticité des espèces (*Zone de rusticité* 2014).

Les résultats de cette recherche de graminées sont présentés à l'Annexe 1, page 48 et suivantes. Les sources d'informations principales sont une encyclopédie en ligne (Société des gens de lettres 2013) et le catalogue en ligne (Lagun-Bouchet 2013). Les diamètres des tiges sont approximatifs, à moins d'un contrôle direct lors d'une visite de pépinière (9 lieux de ventes ont été visités au printemps 2013).

Un tableau analogue est proposé à l'Annexe 2 page 53 pour des espèces de bambous.

### 3.1.3. Sélection d'individus

Aucune haie herbacée n'étant connue dans notre région, afin d'évaluer l'efficacité potentielle des espèces pressenties pour constituer des haies herbacées, nous avons recherché du matériel végétal dans des configurations proches de celles attendues dans de telles haies. Deux solutions complémentaires ont été abordées pour simuler une haie herbacée :

- d'une part utiliser des plantes de plein champ, et
- d'autre part utiliser des plantes issues de pépinières installées en jardinières.

Le Tableau 2 compare les avantages et les limites de ces deux sources de matériel végétal.

**Tableau 2 : synthèse des avantages et limites des différentes sources de matériel végétal utilisées**

	avantages	limites
Plantes de plein champ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- individus matures, touffes de grandes dimensions</li> <li>- présence de mulch et débris végétaux</li> <li>- vie édaphique intense</li> <li>- situation agronomique similaire à celle d'une haie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- densité de plantation initiale faible dans les parcelles à vocation de production énergétique</li> <li>- nombre d'espèces disponibles très restreint (<i>Miscanthus giganteus</i> et <i>Panicum virgatum</i> en Haute-Normandie)</li> </ul>
Plantes en jardinières	<ul style="list-style-type: none"> <li>- large choix chez les pépiniéristes</li> <li>- l'écart entre les touffes peut être choisi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- individus de petites tailles, peu de tiges par touffe</li> <li>- absence de mulch et débris végétaux</li> <li>- infiltration impossible à mesurer</li> </ul>

### 3.1.3.1. Plantes de plein champ

Les plantes cultivées en plein champ susceptibles de répondre à nos critères sont des plantes à vocation énergétique. Leur implantation est pérenne, mais la densité initiale est très inférieure à ce qui est recherché pour maximiser le frein hydraulique. Pour effectuer les mesures nécessaires à notre évaluation, nous avons sélectionné au sein de chaque parcelle des touffes de grandes dimensions (généralement entre 0,5 m et 0,8 m de large) **qui présentent le maximum de tiges et de débris végétaux**, généralement en limite de parcelle. Dans ces conditions, on peut considérer que les mesures sont représentatives de l'optimum de frein hydraulique et d'infiltration d'une haie herbacée bien établie de cette espèce. Mais seules deux espèces ont pu être ainsi testées.

Le Tableau 3 donne les principales caractéristiques des tests menés en plein champ. La planche de photographies de la Figure 11 illustre une culture de plein champ et la touffe qui y a été sélectionnée.

**Tableau 3 : principales caractéristiques des essais réalisés en plein champ**

été / hiver	date de l'essai	lieu	dpt	matériel végétal	particularités	âge lors de l'essai (ans)	Qmin (l/s/m)	Qmax (l/s/m)	pente (%)	nb tests sédiments	surface (m <sup>2</sup> )	densité (nb tiges / m <sup>2</sup> )	diamètre moyen (cm)	VSI
H	2014-03	Etrépagny	27	Miscanthus giganteus	ligne, sans mulch	7	1,6	18,5	4,9	0	0,527	205	1,10	0,670
H	2014-03	Etrépagny	27	Miscanthus giganteus	ligne, avec mulch	7	0,4	18,5	4,9	0	0,527	205	1,10	0,670
H	2014-03	Etrépagny	27	Miscanthus giganteus	touffe, sans mulch	7	1,6	18,5	5,7	0	0,697	301	1,16	1,208
H	2014-03	Etrépagny	27	Miscanthus giganteus	touffe, avec mulch	7	0,4	18,5	5,7	0	0,697	301	1,16	1,208
H	2013-03	Etrépagny	27	Miscanthus giganteus		6	0,6	27,3	3,2	4	0,156	492	0,95	0,895
E	2012-06	Etrépagny	27	Miscanthus giganteus		6	0,9	25,7	4,7	4	0,220	436	1,10	1,426
E	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus	sans bêche amont	5	1,9	19,5	0,8	0	3,820	124	0,86	0,152
E	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus		5	0,6	23,6	4,8	3	0,728	379	0,95	0,689
E	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus	trou 7%	5	1,0	24,4	4,8	0	0,728	353	0,95	0,641
E	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus	trou 15%	5	0,9	22,7	4,8	0	0,728	322	0,95	0,586
E	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus	trou 33%	5	0,9	22,6	4,8	0	0,728	292	0,95	0,531
E	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus	trou 50%	5	0,7	23,6	4,8	0	0,728	190	0,95	0,345
E	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus	souche seule	5	0,7	24,1	4,8	0	0,728	0	0,00	0,000
E	2012-09	Bourneville	27	Miscanthus giganteus		5	1,0	23,4	12,1	4	0,353	329	1,20	1,523
H	2013-04	Etrépagny	27	Panicum virgatum		5	1,0	41,7	5,2	4	0,086	1640	0,30	0,030
E	2012-09	Etrépagny	27	Panicum virgatum		6	0,9	31,3	5,6	4	0,138	1188	0,45	0,109
E	2013-07	Bourneville	27	Panicum virgatum		5	1,1	31,8	6,7	4	0,231	974	0,50	0,136



Champ de *Miscanthus giganteus* au début de l'été avec reprise des pousses et important mulch de tiges et de feuilles au sol. Champ non récolté mais roulé en sortie de l'hiver précédent (Etoutteville, juillet 2013)



Chenal de mesure sur un ensemble de 2 touffes denses de *Miscanthus*



Chenal installé pour mesurer le ralentissement dynamique sur une touffe dense de *Miscanthus*

**Figure 11 : le champ de *Miscanthus giganteus* de Etoutteville et la touffe sélectionnée en son sein pour effectuer les mesures d'efficacité**

### 3.1.3.2. Plantes en jardinières

Pour les plantes issues de pépinières, les tests menés en jardinières présentent des situations plus artificielles : individus non matures, absence de débris végétaux, existence de passages préférentiels entre les touffes, *etc.*. Lors de l'analyse des résultats expérimentaux issus de ces tests, il faut donc garder à l'esprit que les espèces n'étaient pas en situation optimale pour ralentir les écoulements. Par ailleurs, aucun de ces tests n'est représentatif de la situation hivernale.

Afin d'obtenir les individus les mieux développés possibles, nous nous sommes adressés à un fournisseur de plantes en mottes. Outre le potentiel des plantes, tel que décrit dans le tableau de l'Annexe 1, la disponibilité chez les fournisseurs et le développement des individus ont été les principaux critères de choix. Le Tableau 4 présente les espèces et variétés testées, et les principaux paramètres des jardinières qui ont été composées. La planche photographique de la Figure 12 illustre la composition des jardinières. Ces plantes sont décrites et illustrées à l'Annexe 3 page 54 et suivantes.

À l'issue des tests sur les jardinières, ces plantes ont ensuite été plantées sur le site *Hairosion* géré par l'AREAS à Saint Valery en Caux (bas de la Figure 12). Elles vont pouvoir s'y développer et seront disponibles pour d'autres mesures avec le simulateur de ruissellement dès l'été 2014.

**Tableau 4 : principales caractéristiques des essais réalisés en jardinières**

été / hiver	date de l'essai	lieu	dpt	matériel végétal	particularités	développement (note de 1=juvénile à 4=mature)		Qmin (l/s/m)	Qmax (l/s/m)	pente (%)	nb tests sédiments	surface (m <sup>2</sup> )	densité (nb tiges / m <sup>2</sup> )	diamètre moyen (cm)	VSI
E	2013-07	Saint Valery	e	Carex pendula		3	1,1	27,5	4,4	0	0,090	1333	1,00	2,976	
E	2012-09	Fécamp	76	Carex pendula	jardinière no1	2	0,9	12,8	4,2	0	0,210			?	
E	2012-09	Fécamp	76	Carex pendula	jardinière no2	2	1,0	12,6	3,9	0	0,200			?	
E	2013-07	Saint Valery	e	Miscanthus x BSWJ 6749		3	1,1	26,7	4,8	0	0,120	2650	0,40	0,151	
E	2013-07	Saint Valery	e	Miscanthus transmorissonensis		1	1,2	26,5	4,7	0	0,090	2000	0,40	0,114	
E	2013-07	Saint Valery	e	Miscanthus sinensis afrika		1	1,1	25,9	4,8	0	0,120	2200	0,30	0,040	
E	2013-07	Saint Valery	e	Miscanthus sinensis roland		2	1,1	25,6	4,8	0	0,150	1700	0,30	0,031	
E	2013-07	Saint Valery	e	Miscanthus sinensis roland	largeur réduite	2	61,1	61,1	4,8	0	0,061	1700	0,30	0,031	
E	2012-09	Fécamp	76	Miscanthus sinensis variegatus		1	1,0	14,4	4,6	0	0,285	1579	0,25	0,014	
E	2012-09	Fécamp	76	Miscanthus sinensis gracilimus		1	0,9	14,5	4,6	0	0,285	1839	0,25	0,016	
E	2013-07	Saint Valery	e	Panicum virgatum thundercloud gary trucks		3	1,1	27,5	4,8	0	0,078	5526	0,40	0,316	
E	2013-07	Saint Valery	e	Panicum virgatum rehbraun		2	1,0	26,4	4,8	0	0,180	2500	0,20	0,009	
E	2012-09	Fécamp	76	Panicum virgatum heavy metal		1	0,9	13,9	3,9	0	0,285	1947	0,20	0,007	
E	2012-09	Fécamp	76	Panicum virgatum squaw		1	1,0	15,4	3,9	0	0,285	1323	0,35	0,044	
E	2013-07	Saint Valery	e	Calamagrostis acutifolia karl foester		3	1,1	27,2	4,9	0	0,090	5000	0,30	0,090	
E	2013-07	Saint Valery	e	Festuca mairei		3	1,1	26,9	4,8	0	0,072	7208	0,20	0,026	
E	2013-07	Saint Valery	e	Festuca mairei	largeur réduite	3	61,5	61,8	4,8	0	0,029	7208	0,20	0,026	
E	2013-07	Saint Valery	e	F. mairei & M. s. roland		3	1,1	26,2	4,8	0	0,222	3486	0,23	0,023	
E	2013-07	Saint Valery	e	F. mairei & M. s. roland	largeur réduite	3	62,8	62,8	4,8	0	0,091	3486	0,23	0,023	



Figure 12 : mise en jardinière de quelques espèces sélectionnées (en haut), et installation de ces individus en pleine terre après les essais de ruissellement (en bas)

### 3.1.3.3. Plantes sauvages

Une dernière source n'a pas été exploitée dans le cadre de ces travaux exploratoires, il s'agit des plantes sauvages autochtones. Cet aspect pourra être complété dans une phase ultérieure des travaux sur les haies herbacées en Haute-Normandie.

### 3.2. Mesure de l'efficacité des haies herbacées

À la suite des travaux sur les haies arbustives hyperdenses et les fascines (Ouvry et al. 2012), et en s'inspirant de la bibliographie, l'efficacité des haies herbacées est approchée par la mesure du frein hydraulique, de la capacité de sédimentation, et de l'infiltration. Ces mesures sont effectuées à l'aide du simulateur de ruissellement décrit également dans (Ouvry et al. 2012).

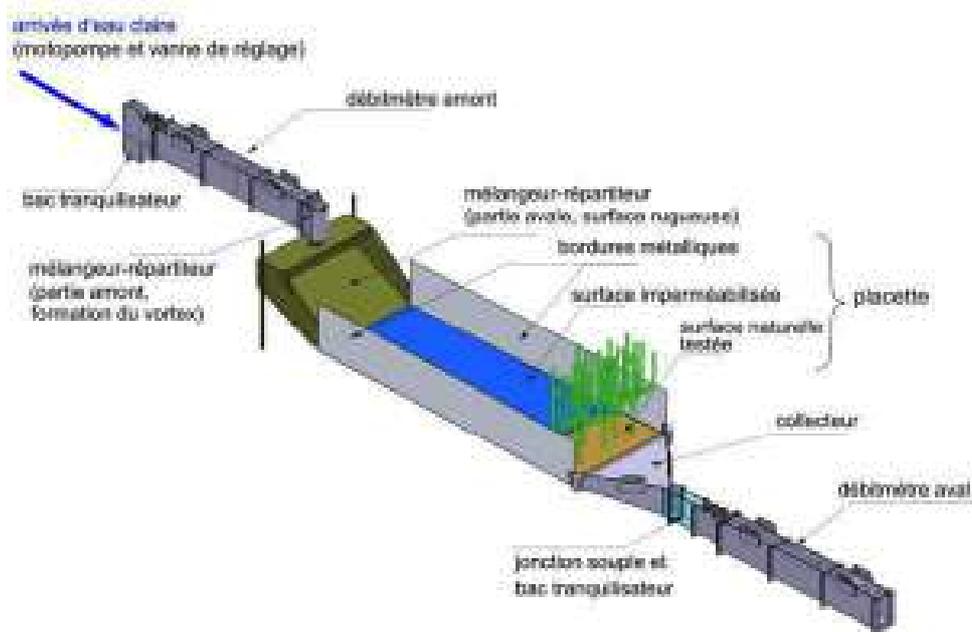


Figure 13 : Schéma des pièces du simulateur de ruissellement permettant la circulation de l'eau autour de l'objet testé

#### 3.2.1. Le simulateur de ruissellement

Un simulateur de ruissellement a été conçu et construit pour mesurer le frein hydraulique, l'infiltration et la sédimentation de toutes les zones tampons. Il représente une amélioration du modèle de l'Irstea<sup>2</sup> (Souiller et al. 2002). Il permet de créer un ruissellement dans une « placette » de largeur réglable de 0,3 m à 1 m et sur une longueur de 6 m.

Cette *placette* est délimitée latéralement par deux tôles verticales d'une longueur de 6 m, placées parallèlement et enfoncées de 10 à 15 cm dans le sol (Figure 13), formant un canal. Ce canal est rigidifié par 16 tiges verticales reliées par des entretoises, dont deux sont visibles sur la Figure 14. Ces entretoises sont installées à l'horizontale et leur altitude relative est mesurée : elles peuvent ainsi servir à mesurer la topographie de la placette, et les hauteurs d'eau aux différents débits. 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. Seul le dernier mètre qui porte la haie correspond à la *surface naturelle testée*. Cette surface, généralement comprise entre 0,1 et 0,7 m<sup>2</sup> (Figure 14), a servi à faire les mesures d'infiltration.

Les débits entrants et sortants de la *placette* sont mesurés en continu à l'aide de deux canaux venturi à section exponentielle de 9 cm de large, équipés de capteurs à ultrasons pour la mesure de la hauteur d'eau, visibles sur la Figure 15. La hauteur d'eau est mesurée chaque seconde et une moyenne est enregistrée toutes les dix secondes sur un enregistreur électronique. L'eau est utilisée en circuit fermé à l'aide d'un réservoir et de deux

<sup>2</sup> Irstea est le nouveau nom du CEMAGREF

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 15). Dix à 30 m<sup>3</sup> 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. L'ensemble *mélangeur – répartiteur* assure un brassage et une répartition homogène du flux d'eau sur toute la largeur de la *placette*. La Figure 15 montre le dispositif complet.

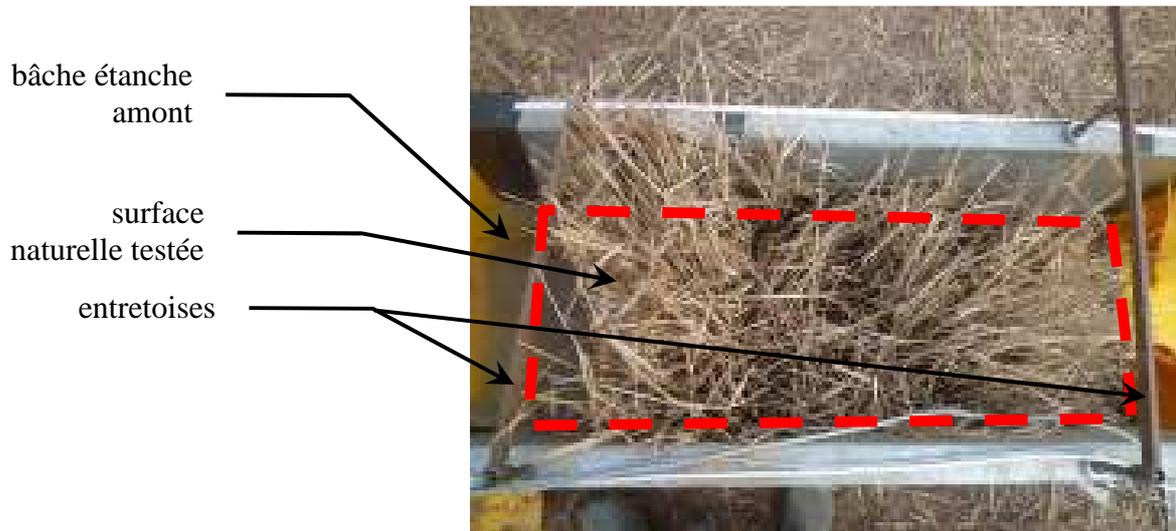


Figure 14 : vue verticale de la « surface naturelle testée » (panic érigé à Etrepagny en 2013)



Figure 15 : Dispositif complet du simulateur de ruissellement vu depuis l'aval (installé sur une fascine à Saint-Gilles-de-la-Neuille)

### 3.2.2. Mesures hydrauliques

Afin d'évaluer la capacité des haies herbacées testées à ralentir les écoulements, les sections en eau sont mesurées sur l'ensemble du canal, et ce pour 4 à 8 débits différents au sein de la gamme des débits possibles, soit entre 0,3 l/s et 6 l/s. De plus, 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  $\pm$  1 l/s.

Ainsi, pour chacun des débits étudiés, la section en eau est mesurée à la verticale de chaque entretoise. En outre, une densité de points plus importante est généralement mesurée au sein de la haie herbacée. La position du ressaut hydraulique est également déterminée. Ces mesures sont effectuées lorsque le régime permanent est atteint, c'est-à-dire lorsque la vitesse d'infiltration est minimale.



Figure 16 : Lecture de la hauteur d'eau tous les 20 cm sur une entretoise

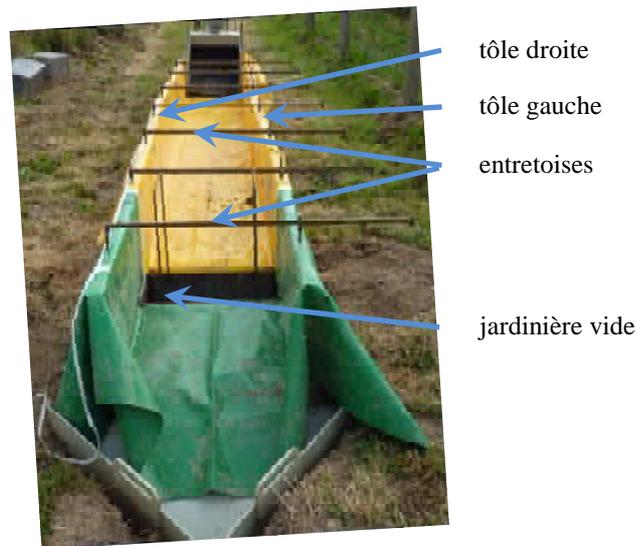


Figure 17 : Le canal de mesure installé pour travailler sur des jardinières, vue des entretoises et des bâches

Les caractéristiques techniques des capteurs ultrasons donnent une incertitude de  $\pm 0,2 \%$  sur la mesure de la hauteur d'eau dans les canaux venturi, ce qui correspond à une incertitude maximale de  $\pm 1,258$  mm par capteur. Dans le cas le plus défavorable, si l'incertitude de chacun des deux capteurs se cumule, l'incertitude totale passe à  $\pm 2,52$  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.

### 3.2.3. Gamme des débits testés

La plupart des essais ont subi des débits compris entre 0,5 l/s/ml et 24 l/s/ml. Comme le montre le Tableau 5, où les débits par unité de largeur inclus dans cette gamme sont sur fond bleu, elle est représentative des débits pouvant traverser un thalweg drainant une surface agricole jusqu'à 50 ha pour des périodes de retour pouvant atteindre 20 ans. Cette gamme de débits couvre donc bien la gamme des fréquences de retour des ruissellements sur laquelle les zones tampons doivent se montrer efficaces, pour des surfaces amont de quelques hectares.

**Tableau 5 : évaluation des débits de pointe par unité de largeur arrivant dans un thalweg en fonction de la surface du bassin versant amont et de la largeur du passage d'eau, supposé horizontal, à partir des fréquences de retour des débits de pointe estimés à Bourville, bassin versant rural de 1045 ha en pays de Caux, en appliquant la méthode *crupedix***

Analyse statistique des débits sur le BV de Bourville.		Evaluation du Qp spécifique (l/s/ml)											
		Surface BV amont 2 ha			Surface BV amont 10 ha			Surface BV amont 25 ha			Surface BV amont 50 ha		
Période (années)	Qp (l/s)	largeur du thalweg (m)			largeur du thalweg (m)			Longueur de haie (m)			largeur du thalweg (m)		
		20	40	80	20	40	80	20	40	80	20	40	80
0,5	571	0,2	0,1	0,1	0,8	0,4	0,2	1,8	0,9	0,4	3,1	1,5	0,8
1	1716	0,7	0,4	0,2	2,5	1,3	0,6	5,3	2,6	1,3	9,2	4,6	2,3
2	2860	1,2	0,6	0,3	4,2	2,1	1,1	8,8	4,4	2,2	15,3	7,7	3,8
5	4374	1,8	0,9	0,4	6,5	3,2	1,6	13,5	6,7	3,4	23,4	11,7	5,9
10	5518	2,3	1,1	0,6	8,2	4,1	2,0	17,0	8,5	4,2	29,6	14,8	7,4
20	6663	2,7	1,4	0,7	9,9	4,9	2,5	20,5	10,3	5,1	35,7	17,9	8,9

### 3.2.4. Mesures sédimentaires

Pour évaluer la capacité d'une zone tampon à provoquer la sédimentation des matières en suspension contenues dans les ruissellements qui lui parviennent, plusieurs tests sont effectués en faisant varier les paramètres débit liquide et granulométrie des sédiments. La concentration en matières en suspension n'a pas été abordée en tant que paramètre car il a été montré que l'efficacité relative est indépendante de la concentration (Dabney et al. 1995).

À chaque test, des sédiments secs et tamisés sont envoyés à débit solide constant pendant une à deux minutes dans un flot en 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 (partie amont du *mélangeur-répartiteur* décrit sur la Figure 13), et le tapis rugueux du plan incliné amenant l'eau jusqu'à la placette d'essai (partie aval du *mélangeur-répartiteur*). La Figure 18 montre l'opération en cours.



**Figure 18 : Apport des sédiments et homogénéisation dans le flux**

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. La localisation des dépôts au sein du canal est notée en fin de chaque essai.

Les matériaux utilisés pour réaliser ces essais sont composés de limons moyens sableux prélevés dans l'horizon labouré (10 à 30 cm). Ils sont donc caractéristiques de ce qui est habituellement entraîné par l'érosion. La préparation des sédiments est ensuite effectuée

par tamisage puis séchage à 105 °C. Deux granulométries ont été préparées pour les différents essais :

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

### **3.2.5. Modélisation**

Le modèle HEC-RAS a été utilisé pour modéliser les lignes d'eau à partir des données de topographie, de débit, et de l'estimation des freins hydrauliques. C'est un modèle en deux dimensions, au sens où il suppose les vitesses d'eau constantes sur l'ensemble d'une section.

### **3.3. *Implantation et entretien***

Comme avec toutes les zones tampons, ou les outils du génie végétal en général, l'implantation et l'entretien de la haie herbacée au cours des premières années conditionnent son efficacité à terme. Les itinéraires techniques permettant de sécuriser le succès de l'implantation est donc une connaissance essentielle.

Au cours de cette phase exploratoire, les informations dans ce domaine seront recueillies au moyen d'études bibliographiques et de recueil d'expériences sur le terrain, y compris en dehors de la Haute-Normandie.



## 4. Résultats des efficacités mesurées

Depuis le printemps 2012 jusqu'au mois de mars 2014, **34 objets ont été testés** avec le simulateur de ruissellement, dont 17 étaient des plantes de plein champ répartis dans 6 parcelles. Les caractéristiques de ces objets et les valeurs synthétiques des mesures réalisées dessus sont présentes dans le Tableau 6. L'ensemble des comptes rendus détaillés de chaque expérimentation est placé dans le document joint intitulé : Haies herbacées Résultats détaillés.

### 4.1. Analyse du frein hydraulique

La Figure 19 présente les valeurs de frein hydraulique des principaux essais.

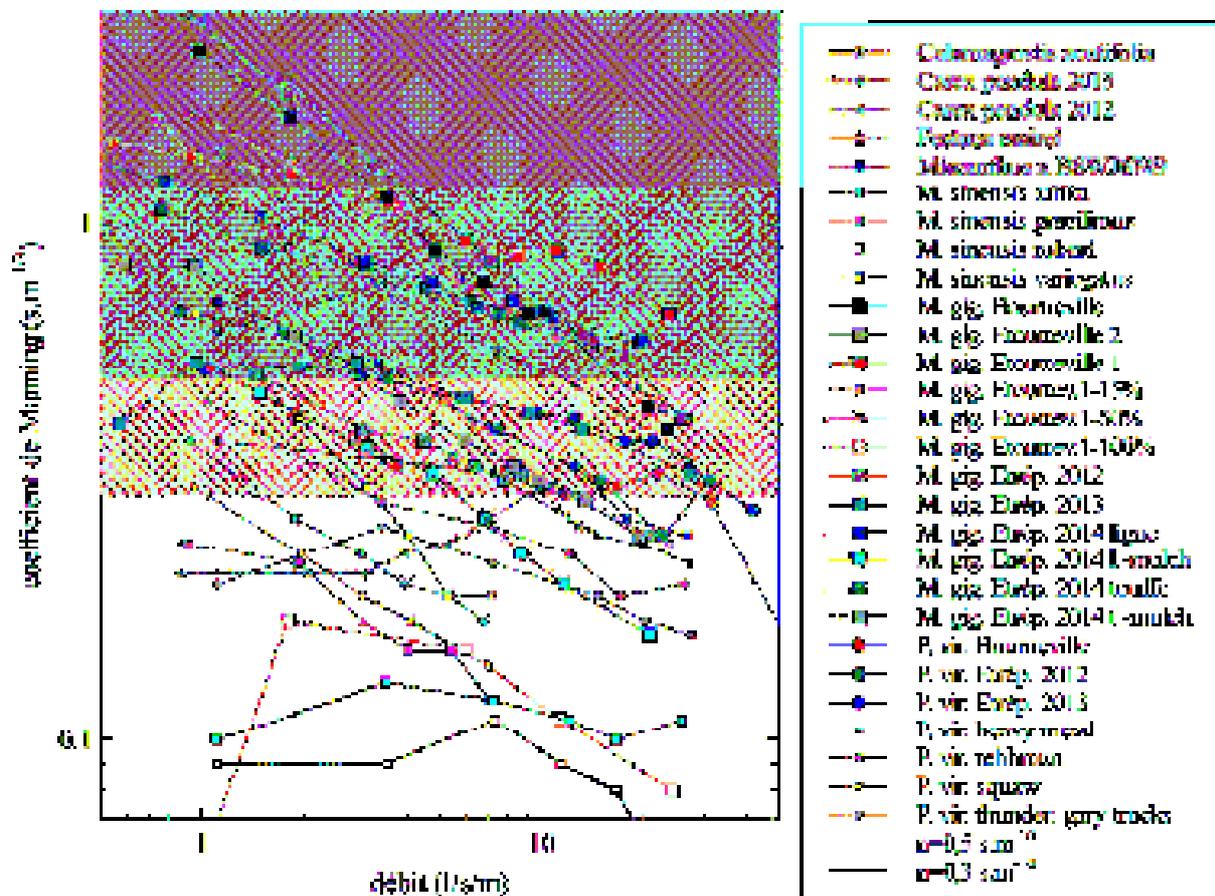


Figure 19 : frein hydraulique en fonction des débits par unité de largeur pour l'ensemble des objets testés

Tableau 6 : synthèse des essais réalisés

Les valeurs des cellules sur fond grisé sont issues d'interpolations linéaires depuis des mesures directes

champ / jardinière		nom court	date de l'essai	lieu	Département	matériel végétal	particularités	âge lors de l'essai (ans)	développement (note de 1=juvénile à 4=mature)	Qmin (l/s/m)	Qmax (l/s/m)	pente (%)	largeur (m)	nb tests sédiments	surface perméable (m <sup>2</sup> )	surface de la haie (m <sup>2</sup> )	densité (nb tiges / m <sup>2</sup> )	nombre de tiges par mètre linéaire	diametre moyen (cm)	VSI	% de plein	n normalisé 6 – 20 l/s/m	infiltration à 1l/s/m (mm/h)	
été / hiver																								
J	E	Carex pendula 2013	2013-07	Saint Valery e	76	Carex pendula		n. a.	3	1,1	27,5	4,4	0,60	0	0,00	0,090	1333	200	1,00	2,976	10,5%	0,59	n. a.	
J	E	Carex pendula 2012	2012-09	Fécamp	76	Carex pendula	jardinière no1	n. a.	2	0,9	12,8	4,2	1,00	0	0,00	0,210	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.	0,28	n. a.	
J	E	CAREX PENDULA N°2 2012	2012-09	Fécamp	76	Carex pendula	jardinière no2	n. a.	2	1,0	12,6	3,9	1,00	0	0,00	0,200	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.	n. a.
C	H	M. gig. Etrép. 2014 ligne	2014-03	Etrépagny	27	Miscanthus giganteus	ligne, avec mulch	7	4	0,4	18,5	4,9	0,67	0	0,99	0,527	205	161	1,10	0,670	1,9%	0,65	485	
C	H	M. gig. Etrép. 2014 l.-mulch	2014-03	Etrépagny	27	Miscanthus giganteus	ligne, sans mulch	7	4	1,6	18,5	4,9	0,67	0	0,99	0,527	205	161	1,10	0,670	1,9%	0,21	n. c.	
C	H	M. gig. Etrép. 2014 touffe	2014-03	Etrépagny	27	Miscanthus giganteus	touffe, avec mulch	7	4	0,4	18,5	5,7	0,70	0	1,23	0,697	301	300	1,16	1,208	3,2%	0,65	186	
C	H	M. gig. Etrép. 2014 t.-mulch	2014-03	Etrépagny	27	Miscanthus giganteus	touffe, sans mulch	7	4	1,6	18,5	5,7	0,70	0	1,23	0,697	301	300	1,16	1,208	3,2%	0,30	n. c.	
C	H	M. gig. Etrép. 2013	2013-03	Etrépagny	27	Miscanthus giganteus		6	4	0,6	27,3	3,2	0,53	4	0,72	0,156	492	145	0,95	0,895	3,5%	0,41	5	
C	E	M. gig. Etrép. 2012	2012-06	Etrépagny	27	Miscanthus giganteus		6	4	0,9	25,7	4,7	0,56	4	0,70	0,220	436	171	1,10	1,426	4,1%	0,71	142	
C	E	M. gig. Etoutteville 2	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus	sans bâche amont	5	4	1,9	19,5	0,8	0,70	0	3,82	3,820	124	676	0,86	0,152	0,7%	0,31	0	
C	E	M. gig. Etoutteville 1	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus		5	4	0,6	23,6	4,8	0,70	3	0,82	0,728	379	394	0,95	0,689	2,7%	0,85	117	
C	E	M. gig. Etoutteville.1-7%	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus	trou 7%	5	4	1,0	24,4	4,8	0,70	0	0,82	0,728	353	367	0,95	0,641	2,5%	0,68	n. c.	
C	E	M. gig. Etoutteville.1-15%	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus	trou 15%	5	4	0,9	22,7	4,8	0,70	0	0,82	0,728	322	335	0,95	0,586	2,3%	0,61	n. c.	
C	E	M. gig. Etoutteville.1-33%	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus	trou 33%	5	4	0,9	22,6	4,8	0,70	0	0,82	0,728	292	304	0,95	0,531	2,1%	0,44	n. c.	
C	E	M. gig. Etoutteville.1-50%	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus	trou 50%	5	4	0,7	23,6	4,8	0,70	0	0,82	0,728	190	197	0,95	0,345	1,3%	0,33	n. c.	
C	E	M. gig. Etoutteville.1-100%	2013-07	Etoutteville	76	Miscanthus giganteus	souche seule	5	4	0,7	24,1	4,8	0,70	0	0,82	0,728	0	0	0,00	0,000	0,0%	0,12	n. c.	
C	E	M. gig. Bourneville 2012	2012-09	Bourneville	27	Miscanthus giganteus		5	4	1,0	23,4	12,1	0,54	4	0,59	0,353	329	217	1,20	1,523	3,7%	0,63	15	
J	E	Miscanthus x BSWJ6749	2013-07	Saint Valery e	76	Miscanthus x BSWJ 6749		n. a.	3	1,1	26,7	4,8	0,60	0	0,00	0,120	2650	530	0,40	0,151	3,3%	0,35	n. a.	
J	E	M. transmorrisonensis	2013-07	Saint Valery e	76	Miscanthus transmorrisonensis		n. a.	1	1,2	26,5	4,7	0,60	0	0,00	0,090	2200	300	0,40	0,114	2,5%	0,10	n. a.	
J	E	M. sinensis afrika	2013-07	Saint Valery e	76	Miscanthus sinensis afrika		n. a.	1	1,1	25,9	4,8	0,60	0	0,00	0,120	2200	440	0,30	0,040	1,6%	0,12	n. a.	
J	E	M. sinensis roland	2013-07	Saint Valery e	76	Miscanthus sinensis roland		n. a.	2	1,1	25,6	4,8	0,60	0	0,00	0,150	1700	425	0,30	0,031	1,2%	0,09	n. a.	
J	E	M. sinensis roland	2013-07	Saint Valery e	76	Miscanthus sinensis roland	largeur réduite	n. a.	2	61,1	61,1	4,8	0,25	0	0,00	0,061	1700	425	0,30	0,031	1,2%	n. c.	n. a.	
J	E	M. sinensis variegatus	2012-09	Fécamp	76	Miscanthus sinensis variegatus		n. a.	1	1,0	14,4	4,6	1,00	0	0,00	0,285	1579	450	0,25	0,014	0,8%	0,19	n. a.	
J	E	M. sinensis gracilimus	2012-09	Fécamp	76	Miscanthus sinensis gracilimus		n. a.	1	0,9	14,5	4,6	1,00	0	0,00	0,285	1839	524	0,25	0,016	0,9%	0,13	n. a.	
C	H	P. vir. Etrép. 2013	2013-04	Etrépagny	27	Panicum virgatum		5	4	1,0	41,7	5,2	0,43	4	0,53	0,086	1640	328	0,30	0,030	1,2%	0,42	140	
C	E	P. vir. Etrép. 2012	2012-09	Etrépagny	27	Panicum virgatum		6	4	0,9	31,3	5,6	0,47	4	0,69	0,138	1188	349	0,45	0,109	1,9%	0,35	5	
C	E	P. vir. Bourneville	2013-07	Bourneville	27	Panicum virgatum		5	4	1,1	31,8	6,7	0,42	4	0,50	0,231	974	536	0,50	0,136	1,9%	0,32	150	
J	E	P. vir. thunder. gary trucks	2013-07	Saint Valery e	76	Panicum virgatum thundercloud gary trucks		n. a.	3	1,1	27,5	4,8	0,60	0	0,00	0,078	5526	718	0,40	0,316	6,9%	0,20	n. a.	
J	E	P. vir. rehbraun	2013-07	Saint Valery e	76	Panicum virgatum rehbraun		n. a.	2	1,0	26,4	4,8	0,60	0	0,00	0,180	2500	750	0,20	0,009	0,8%	0,23	n. a.	
J	E	P. vir. heavy metal	2012-09	Fécamp	76	Panicum virgatum heavy metal		n. a.	1	0,9	13,9	3,9	1,00	0	0,00	0,285	1947	555	0,20	0,007	0,6%	0,18	n. a.	
J	E	P. vir. squaw	2012-09	Fécamp	76	Panicum virgatum squaw		n. a.	1	1,0	15,4	3,9	1,00	0	0,00	0,285	1323	377	0,35	0,044	1,3%	0,15	n. a.	
J	E	Calamagrostis acutifolia	2013-07	Saint Valery e	76	Calamagrostis acutifolia karl foester		n. a.	3	1,1	27,2	4,9	0,60	0	0,00	0,090	5000	750	0,30	0,090	3,5%	0,28	n. a.	
J	E	Festuca mairei	2013-07	Saint Valery e	76	Festuca mairei		n. a.	3	1,1	26,9	4,8	0,60	0	0,00	0,072	7208	865	0,20	0,026	2,3%	0,50	n. a.	
J	E	Festuca mairei	2013-07	Saint Valery e	76	Festuca mairei	largeur réduite	n. a.	3	61,5	61,8	4,8	0,25	0	0,00	0,029	7208	865	0,20	0,026	2,3%	n. c.	n. a.	
J	E	Fétuque & M. sin. roland	2013-07	Saint Valery e	76	F. mairei & M. s. roland		n. a.	3	1,1	26,2	4,8	0,60	0	0,00	0,222	3486	1290	0,23	0,023	1,5%	0,31	n. a.	
J	E	Fétuque & M. sin. roland	2013-07	Saint Valery e	76	F. mairei & M. s. roland	largeur réduite	n. a.	3	62,8	62,8	4,8	0,25	0	0,00	0,091	3486	1290	0,23	0,023	1,5%	n. c.	n. a.	
J	E	Grille 2 mm	2013-07	Saint Valery e	76	baguette de bois 10mm	écartement 2mm	n. a.	n. a.	1,1	26,1	4,7	0,60	0	0,00	0,009	5556	83	1,00	12,400	43,6%	0,32	n. a.	
J	E	Grille 4 mm	2013-07	Saint Valery e	76	baguette de bois 10mm	écartement 4mm	n. a.	n. a.	1,1	26,0	4,7	0,60	0	0,00	0,009	4762	71	1,00	10,629	37,4%	0,10	n. a.	
J	E	Grille 6 mm	2013-07	Saint Valery e	76	baguette de bois 10mm	écartement 6mm	n. a.	n. a.	1,2	25,7	4,7	0,60	0	0,00	0,009	4167	63	1,00	9,300	32,7%	0,05	n. a.	
J	E	Grille 8 mm	2013-07	Saint Valery e	76	baguette de bois 10mm	écartement 8mm	n. a.	n. a.	1,1	25,8	4,7	0,60	0	0,00	0,009	3704	56	1,00	8,267	29,1%	0,04	n. a.	

On voit là que la gamme des coefficients de Manning qui ont été mesurés est très large, depuis des valeurs proches de celles des herbes (de l'ordre de  $0,1 s \cdot m^{-1/3}$ ), jusque des valeurs supérieures à  $1 s \cdot m^{-1/3}$ . Afin de pouvoir comparer les capacités de frein hydraulique

des différentes haies testées, un indicateur normalisé a été retenu : la moyenne des coefficients de Manning à 6 l/s/m, 10 l/s/m, 15 l/s/m, et 20 l/s/m. Ces valeurs sont présentes dans le Tableau 6, et reportées sous forme d'histogramme sur la Figure 20. Un gradient de couleurs a été appliqué à ces valeurs selon leur position par rapport aux seuils de  $0,3 s \cdot m^{-1/3}$  et  $0,5 s \cdot m^{-1/3}$ .

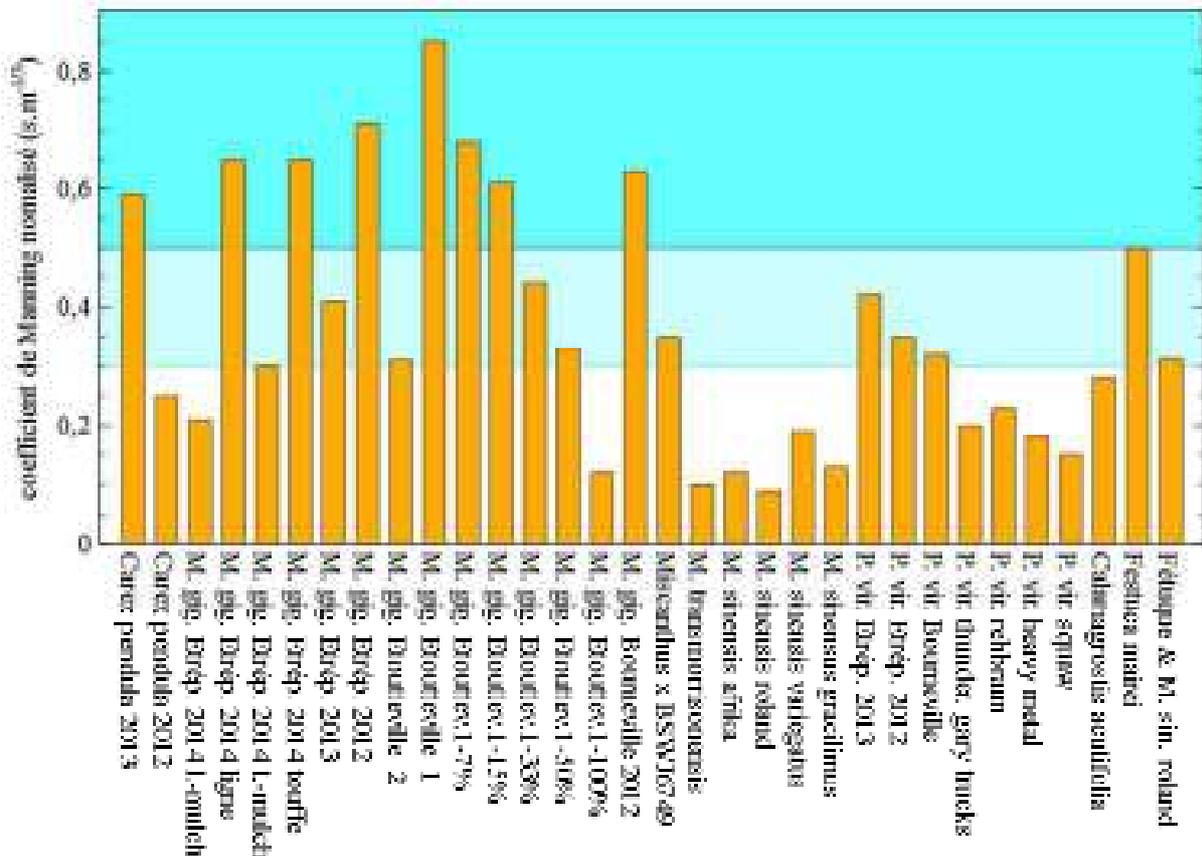


Figure 20 : coefficients de Manning normalisés des différents essais réalisés

#### 4.1.1. Des résultats conformes à la littérature

Sur la Figure 21, les valeurs de frein hydraulique d’une sélection d’objets parmi les plus intéressants ont été comparées à celles obtenues par (Dabney et al. 1995). Les gammes de débits par unité de largeur de ces deux séries d’essais se recoupent dans une large bande, entre 10 l/s/m et 24 l/s/m. Les gammes des freins hydrauliques de ces deux séries convergent assez largement, surtout au-delà de 15 l/s/m.

Plus en détail, on constate que les freins hydrauliques mesurés sur panics érigés ici sont généralement plus faibles que leurs équivalents américains (swi-200, swi-210, kan-310, kan-760). On peut supposer que ces plantes se développent mieux sous le climat du sud des États-Unis, où ces mesures ont été faites, que sous le climat tempéré et doux de Normandie.

Un seul objet à base de miscanthus giganteus a été testé par Dabney et son équipe et à un seul débit (mis-150 :  $n = 0,33 s \cdot m^{-1/3}$  pour  $Q = 21,8 l/s/m$ ). Pour ce débit, cette valeur est assez centrée dans la gamme des freins hydrauliques mesurés au champ avec du miscanthus : de  $0,16 s \cdot m^{-1/3}$  pour la ligne sans mulch testée à Etrépagny en 2014, jusqu’à  $0,67 s \cdot m^{-1/3}$  mesuré à Etoutteville.

Nos résultats expérimentaux sont donc cohérents avec ceux disponibles dans la littérature.

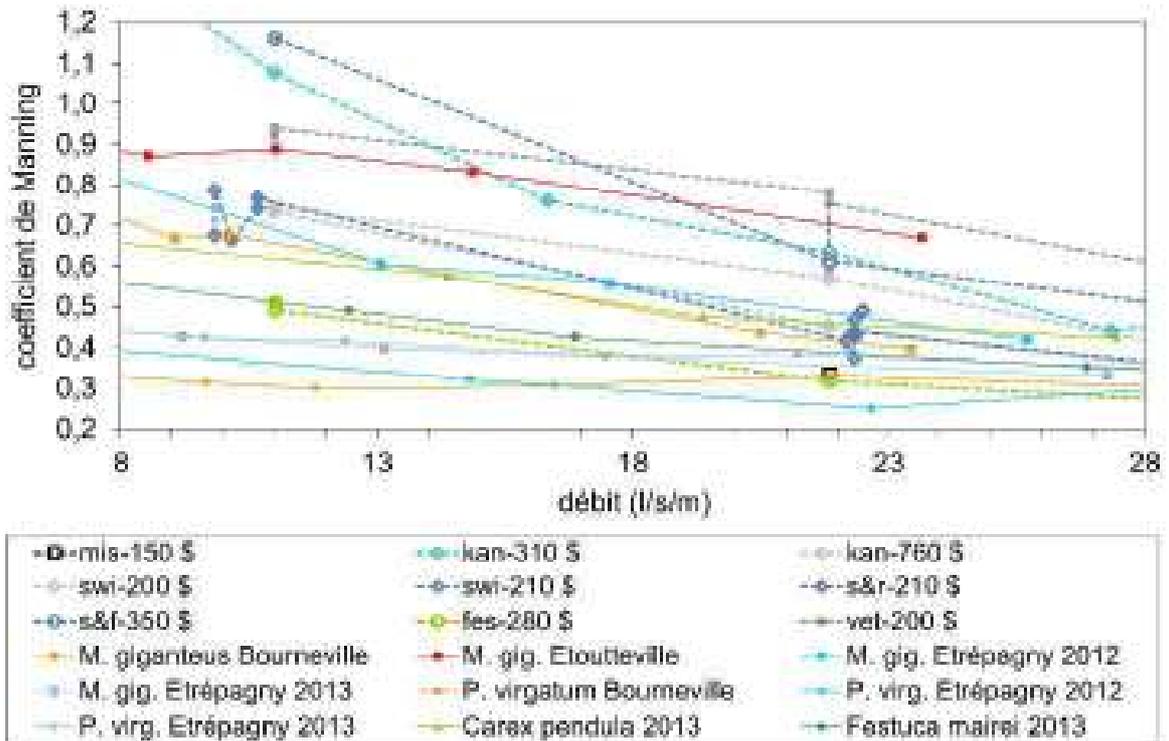


Figure 21 : coefficients de Manning en fonction du débit par unité de largeur pour des objets présentant les plus forts freins hydrauliques par rapport aux résultats obtenus par (Dabney et al. 1995) (Ouvry et al. 2012)(\$ : résultats de Dabney et al. ; mis : Miscanthus giganteus ; swi : panic érigé sauvage ; kan : panic érigé kanlow ; fes : fétuque élevée ; vet : vétiver ; s&r : panic érigé et résidus ; s&f : association panic érigé et fétuque élevée ; le nombre à trois chiffres désigne la largeur de la haie en millimètres – dans le sens de l’écoulement)

### 4.1.2. Comparaison avec les fascines

La Figure 22 permet de comparer les freins hydrauliques en fonction du débit par unité de largeur pour une sélection d'objets parmi les plus intéressants avec les gammes de valeurs établies pour les fascines. Entre 5 et 15 l/s/m, on voit que les freins hydrauliques de tous ces objets sont supérieurs au seuil de  $0,3 s \cdot m^{-1/3}$  que nous nous sommes fixé (§ 3.1.1.1 page 11), et qui correspond à l'efficacité minimale attendue d'une fascine qualifiée de *moyenne*. Plusieurs objets ont montré un frein hydraulique supérieur à  $0,5 s \cdot m^{-1/3}$ , sans qu'aucun n'atteigne la gamme définie pour les *fascines très fortes*. Ils sont au nombre de 9, visibles dans la zone bleue soutenue de la Figure 19, dont 7 *Miscanthus giganteus*, 1 *Carex pendula* et 1 *Festuca mairei*. Parmi ces 9 objets, 2 sont représentatifs de la situation hivernale. Les meilleurs panics érigés testés sont dans la gamme des *fascines moyennes*.

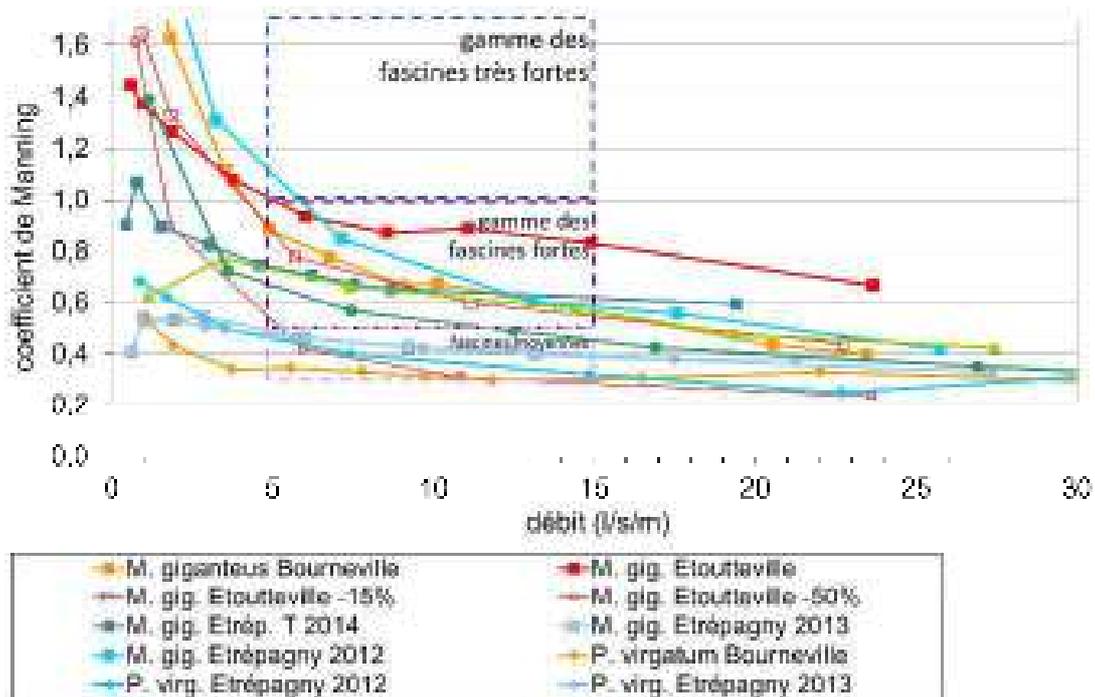


Figure 22 : coefficients de Manning en fonction du débit par unité de largeur pour des objets présentant les plus forts freins hydrauliques par rapport aux gammes d'efficacité des fascines mesurées par (Ouvry et al. 2012)

**Il semble donc possible de constituer des haies herbacées en Haute-Normandie présentant une efficacité similaire à celle des fascines fortes.**

### 4.1.3. Analyse de la saisonnalité

Cette section permet d'aborder la question des capacités des haies herbacées en dehors de la saison végétative, notamment entre octobre et mai. Pour y répondre, une série de mesures a été menée en sortie d'hiver, juste avant la récolte des plantes de plein champ. Leurs résultats sur le frein hydraulique sont comparés aux essais d'été sur la Figure 23 pour le miscanthus, et sur la Figure 24 pour le panic érigé.

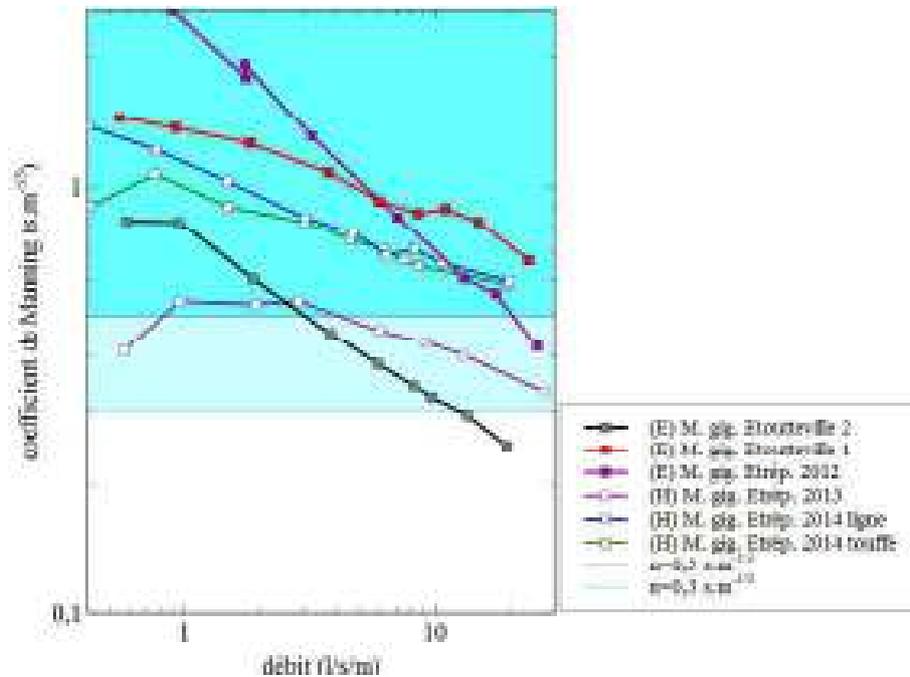


Figure 23 : frein hydraulique en fonction du débit par unité de largeur et de la saison pour les miscanthus gigantes de plein champ ((E) : mesures d'été, en pleine végétation ; (H) : mesures en fin d'hiver, sur la production de l'été précédent)

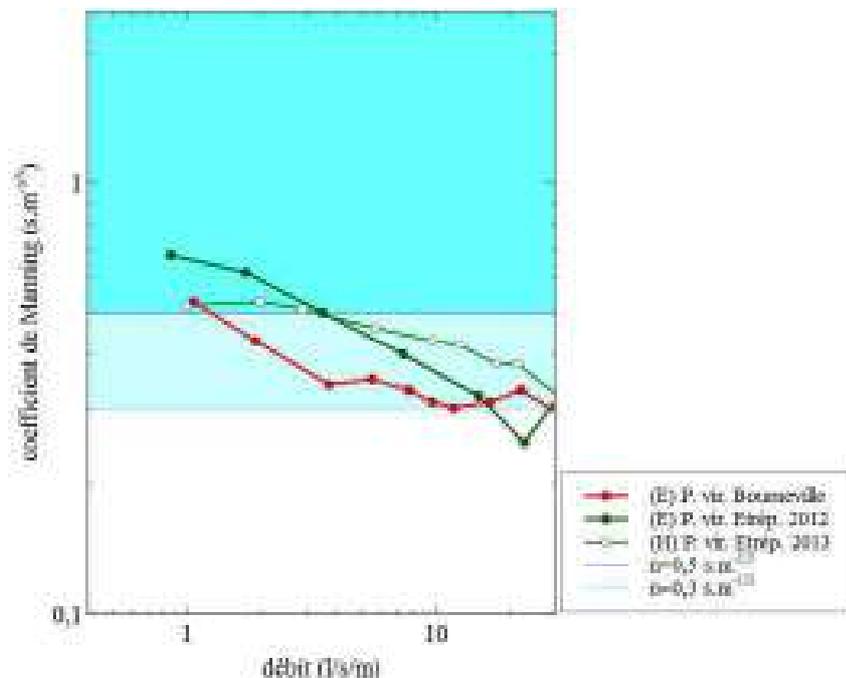


Figure 24 : frein hydraulique en fonction du débit par unité de largeur et de la saison pour les panics érigés de plein champ ((E) : mesures d'été, en pleine végétation ; (H) : mesures en fin d'hiver, sur la production de l'été précédent)

L'ensemble de ces résultats tend à montrer que le frein hydraulique des haies de *Miscanthus giganteus* et de panic érigé est similaire en été et en hiver.

#### 4.1.4. Analyse de l'effet des passages préférentiels

À Etoutteville, après avoir effectué une série de mesures sur la touffe de *Miscanthus giganteus* sélectionnée, plusieurs séries de mesures ont été menées en altérant progressivement la qualité de l'obstacle offert par la plante à l'écoulement, afin d'évaluer l'effet de la présence de passages préférentiels sur le frein hydraulique d'une haie herbacée.



Figure 25 : la touffe de *Miscanthus giganteus* à Etoutteville avec une trouée de 23 cm, soit 33 % de la largeur du canal (prise de vue de l'amont vers l'aval).

Pour ce faire, une trouée de largeur déterminée a été réalisée d'un bout à l'autre de la touffe dans le sens de l'écoulement en coupant les tiges au ras du sol. Tiges coupées, débris végétaux et humus ont été exportés, afin de laisser cette trouée totalement nue (Figure 25). Cinq tailles de trouées ont été testées, représentant 7 %, 15 %, 33 %, 50 % et 100 % de la largeur totale. La Figure 26 présente les freins hydrauliques mesurés en fonction du débit par unité de largeur.

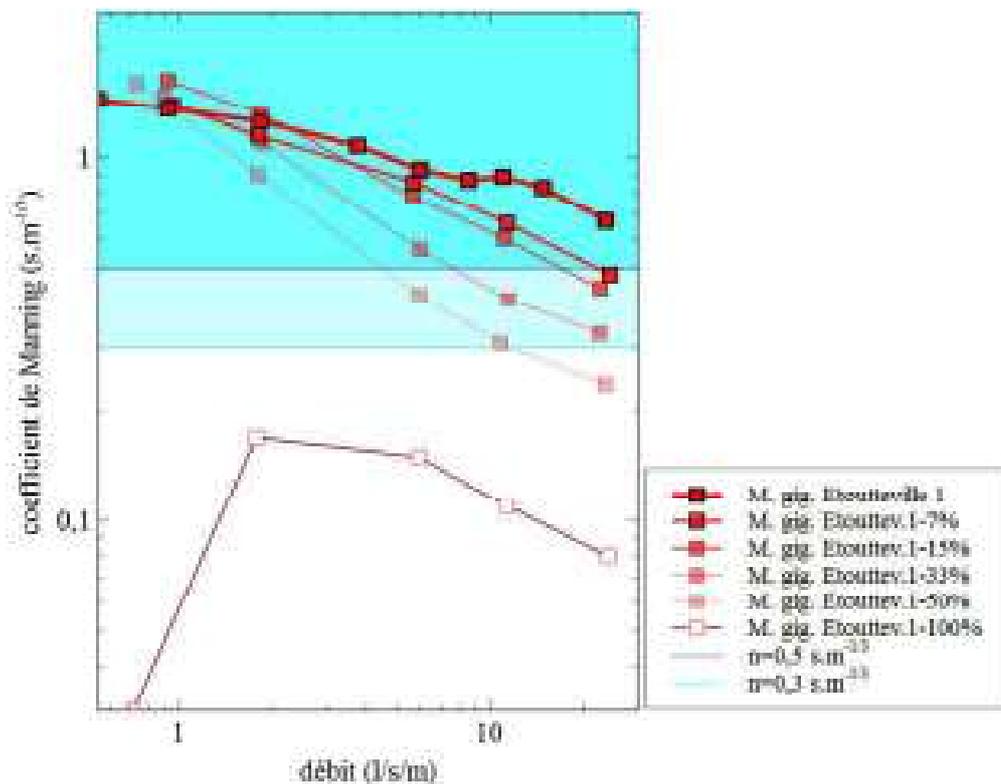


Figure 26 : frein hydraulique en fonction du débit par unité de largeur pour différentes tailles de trouées en travers de la touffe de *Miscanthus giganteus* à Etoutteville.

On voit sur la Figure 26 que le frein hydraulique est peu affecté par la présence d'une trouée jusqu'à 1/3 de la largeur totale pour des débits allant jusqu'à 2 l/s/m. Au-delà, la différence de frein hydraulique devient significative. Ces différences sont mises en évidence sur les deux figures suivantes, qui montrent le frein hydraulique en fonction de la taille de la trouée pour différents débits, de 6 l/s/m à 23 l/s/m. On y voit que le frein hydraulique chute rapidement dès l'apparition d'une trouée. La Figure 28 peut être interprétée ainsi : il suffit que

la taille du trou dans la touffe atteint 14 à 18 cm, soit 20 à 25 % de la largeur totale, pour perdre la moitié de l'efficacité qui peut être perdue.

Au regard des seuils d'efficacité qui ont été fixés, on pourrait aussi recommander de ne pas laisser de passages préférentiels dans une haie herbacée de plus de 10 cm de large, représentant au plus 15 % de la largeur totale de la haie.

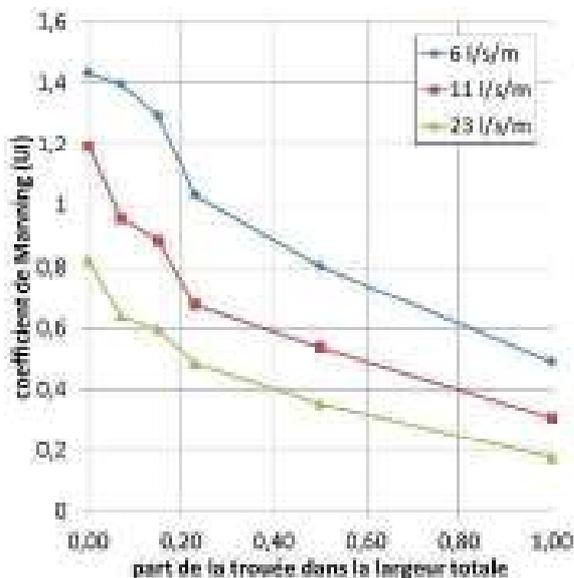


Figure 27 : frein hydraulique en fonction de la taille de la trouée pour différents débits

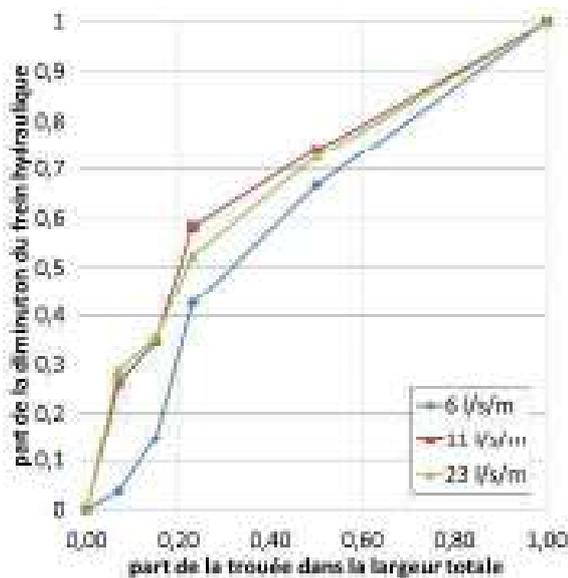


Figure 28 : diminution relative du frein hydraulique en fonction de la taille de la trouée pour différents débits

#### 4.1.5. Rôle du mulch

Deux objets ont été sélectionnés au sein d'une parcelle de *Miscanthus giganteus* à Etrépagny en mars 2014, afin de mesurer leur comportement face au ruissellement. Deux séries de tests ont été menées sur chacun de ces objets :

- en situation naturelle, notamment sans perturber les feuilles, fleurs, et autres fragments végétaux accumulés au sol (autrement appelé *le mulch*) ;
- après avoir retiré l'intégralité du mulch, et ne conservant sur la placette que les tiges encore solidaires du sol.

Les photos de la Figure 29 illustrent ces deux situations pour l'un de ces objets.



Figure 29 : la touffe à Etrépagny (mars 2014), situation naturelle initiale avec mulch à gauche, et après avoir retiré le mulch à droite.

Ces deux objets ont en commun leur position en bord de parcelle et leur richesse initiale en mulch (1,6 kg de matière sèche par m<sup>2</sup> dans les deux cas, présente essentiellement sur les 25 premiers centimètres au-dessus du sol), et diffèrent par leur développement :

- l'un est *une touffe* circulaire particulièrement développée par le diamètre total (~1,2 m) et le nombre de tiges (300 tiges/ml,  $VSI = 1,2 \text{ in}^4/\text{ft}^2$ ) ;
- l'autre est une partie *d'une ligne* continue de miscanthus de plusieurs mètres de long et d'environ 0,8 m de large, et présentant une densité de tiges moindre (161 tiges/ml,  $VSI = 0,67 \text{ in}^4/\text{ft}^2$ ).

La *touffe* représente donc l'optimum de développement du miscanthus giganteus à l'échelle d'un individu, tandis que la *ligne* est représentative de ce que pourrait être une haie herbacée de moins d'un mètre de large au bout de quelques années. La Figure 30 rend compte des freins hydrauliques de ces 4 séries en fonction du débit par unité de largeur.

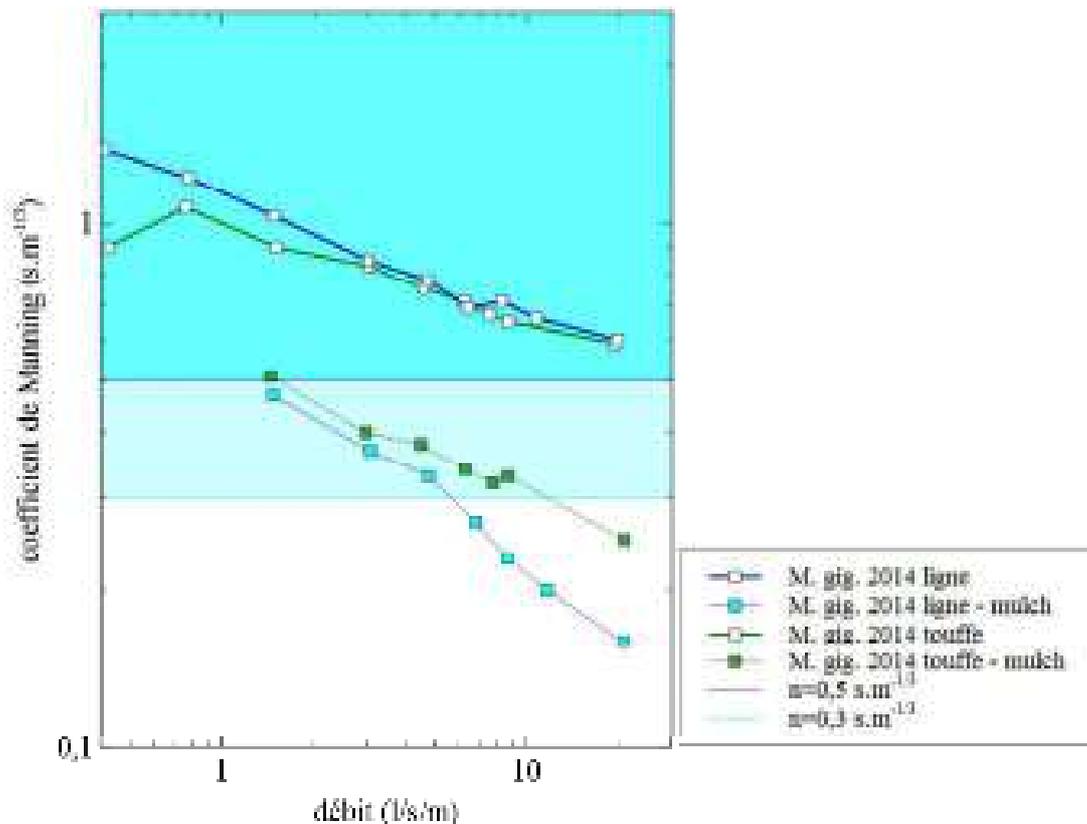


Figure 30 : frein hydraulique en fonction du débit par unité de largeur pour deux objets avec ou sans mulch (Etrépagny 2014)

Ainsi, en présence d'une quantité importante de mulch répartie sur une épaisseur de 25 cm et retenue par les tiges, le frein hydraulique est identique pour ces deux objets, malgré la grande différence de nombre de tiges par unité de largeur. Le coefficient de Manning normalisé entre 6 et 20 l/s/m est de  $0,65 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$  pour ces deux objets, valeur parmi les plus élevées mesurées dans le cadre de ces recherches.

Les valeurs de frein hydraulique sont sensiblement plus modestes en l'absence de mulch, et la différence de densité de tiges est perceptible. Les coefficients de Manning normalisés ne dépassent pas le seuil limite de  $0,3 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ .

**Le mulch a donc un rôle essentiel dans l'efficacité du frein hydraulique du *Miscanthus giganteus*. En son absence, même une haie herbacée dont le VSI est très supérieur au seuil de  $0,1 \text{ in}^4/\text{ft}^2$  donné par l'USDA ne dépasse pas le seuil de frein hydraulique minimal que nous nous sommes fixé à  $0,3 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ .**

Ce constat permet d'expliquer les résultats obtenus avec le panic érigé, quelle que soit sa variété. Aucun des tests menés sur cette espèce n'a donné de coefficient de Manning normalisé supérieur à  $0,5 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ . Dans cette espèce, les premières feuilles sont à plusieurs centimètres du sol, et le sol est laissé nu entre les tiges, aucun mulch ne s'y accumulant.

#### 4.1.6. Intérêt des associations

On peut imaginer combiner les qualités de deux plantes en constituant une haie herbacée avec deux lignes monospécifiques accolées. C'est ce qui a été testé en jardinière (Figure 31) en utilisant *Festuca mairei* à l'amont, représentant une plante relativement basse et au port souple avec une forte densité de tiges et de feuilles au niveau du sol, et à l'aval *Miscanthus sinensis roland*, grande plante à grosses tiges mais ne présentant pas de feuilles au ras du sol. Ainsi, la plante placée en première ligne présente un potentiel de frein hydraulique important, et le risque de verse sous la pression du flux est réduit par la présence de la plante en seconde ligne qui sert de tuteur.

En effet, comme on peut le voir sur la Figure 32, le frein hydraulique de la fétuque chute de façon significative pour les débits spécifiques supérieurs à  $30 \text{ l/s/m}$ . Par ailleurs, le frein hydraulique offert par le miscanthus « Roland » est peu intéressant au regard de nos objectifs. Rappelons néanmoins que les individus qui ont servi à composer cette jardinière étaient peu développés.



Figure 31 : le couple *Festuca mairei* -- *Miscanthus sinensis roland* en place dans le canal du simulateur de ruissellement (l'amont est à gauche).

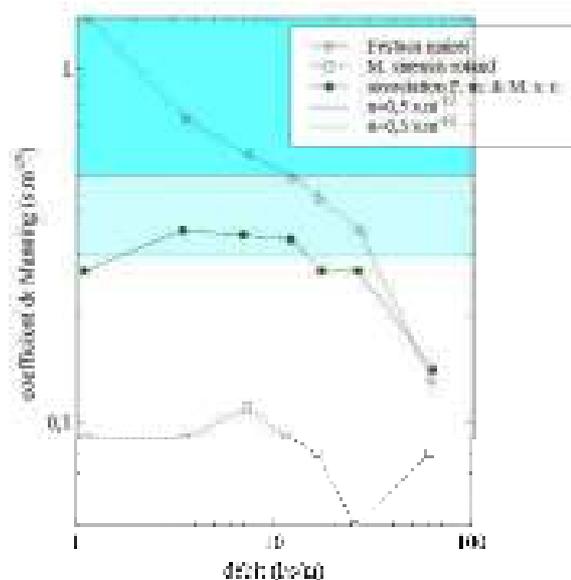


Figure 32 : frein hydraulique en fonction du débit par unité de largeur pour deux objets et leur association

Le frein hydraulique mesuré pour l'association des deux herbacées est intermédiaire entre ceux des plantes prises séparément. Si ces résultats ne sont pas probants, il nous semble que cela est dû au matériel végétal disponible plutôt qu'au principe de l'association. Des essais complémentaires seront donc nécessaires pour valider ou invalider cette piste des associations.

Cependant, l'idée paraît intéressante du point de vue pratique : en plaine, une haie double pourrait se montrer plus robuste qu'une haie simple face aux événements pouvant altérer les capacités d'une haie herbacée tels que l'effondrement face à un débit très important, ou la formation de passages préférentiels dus au passage d'animaux. Elle mériterait d'être approfondie.

### 4.1.7. Modélisation

Le modèle HEC-RAS a été utilisé pour vérifier les valeurs de coefficients de Manning déterminés à partir de nos mesures de terrain. Cette modélisation a été effectuée sur quelques cas. L'un d'eux est reporté sur la Figure 33 et la Figure 34. La topographie étant renseignée dans le modèle, la modélisation consiste à faire varier le coefficient de Manning affecté à la haie herbacée jusqu'à retrouver les hauteurs d'eau constatées sur le terrain pour un débit donné.

Les résultats de la Figure 34 montrent des résultats assez convergents, mais ce n'est pas le cas de tous les essais qui ont été modélisés. Des développements supplémentaires sont nécessaires pour éclaircir ce point.

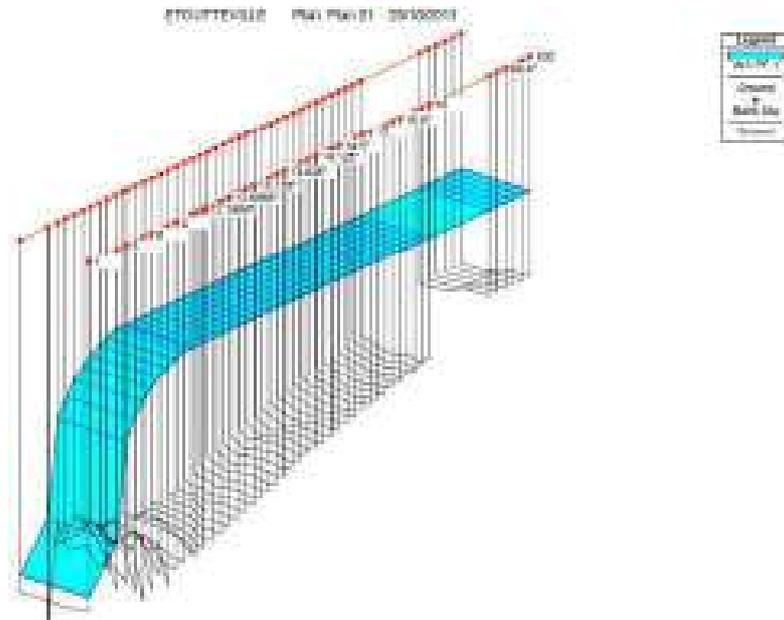


Figure 33 : modélisation de la ligne d'eau avec HEC-RAS, à partir de la topographie et de la rugosité hydraulique, cas du *M. giganteus* étudié à Etoutteville en 2013

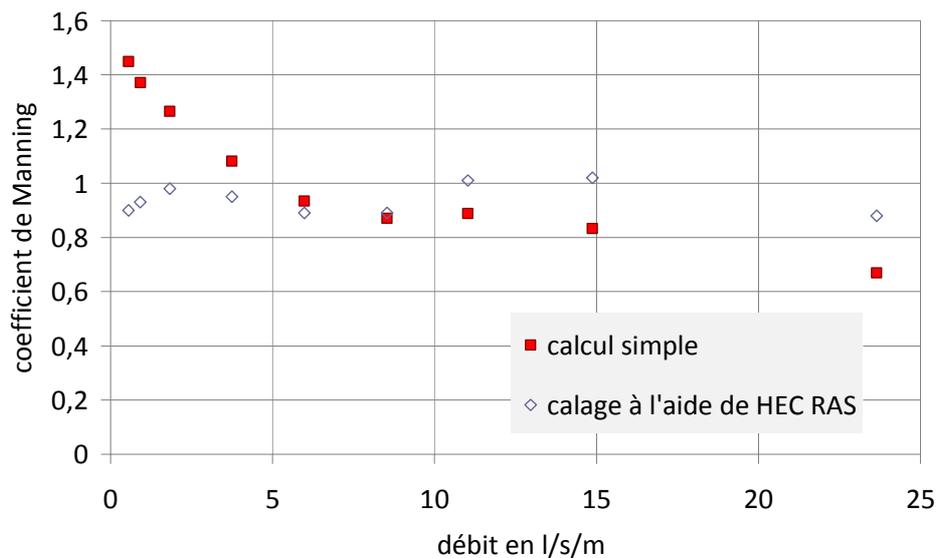


Figure 34 : coefficients de Manning déduits de nos mesures de terrain, en rouge, et issus du calage à l'aide de HEC-RAS, pour le *M. giganteus* étudié à Etoutteville en 2013

## 4.2. Critères de sélection des plantes

Le principal critère hydraulique donné dans la littérature pour sélectionner les plantes pouvant servir de haie herbacée est basé sur le VSI. Ce critère a l'avantage de pouvoir être facilement déterminé, sans recourir à des mesures hydrauliques, rapidement et de façon non destructive. Nos mesures de frein hydraulique permettent de vérifier la validité de ce critère pour la sélection de matériel végétal en vue de constituer des haies herbacées (Figure 35). Sur ce graphique, afin d'en faciliter l'interprétation, les repères ont été reportés, seuils de VSI et de coefficients de Manning.

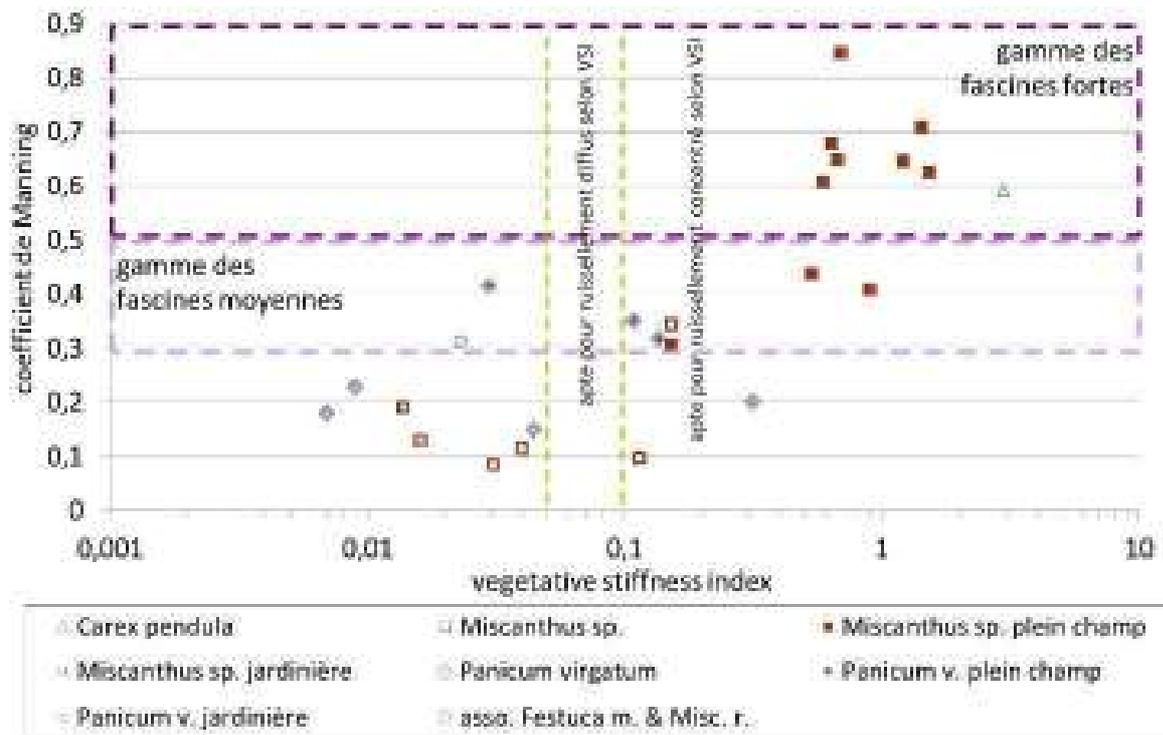


Figure 35 : coefficients de Manning normalisés en fonction du VSI

L'usage du VSI dans le but de sélectionner des plantes aptes à constituer des haies herbacées semble donc délicat : deux essais ont montré des freins hydrauliques inférieurs à  $0,2 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$  avec des valeurs de VSI supérieures à  $0,1 \text{ in}^4/\text{ft}^2$ .

En l'état de nos résultats expérimentaux, on pourrait proposer de modifier le seuil donné par l'USDA pour la valeur de  $VSI \geq 0,4 \text{ in}^4/\text{ft}^2$ . De plus, nous avons montré à la section 4.1.5 le rôle essentiel du mulch pour disposer d'un frein hydraulique satisfaisant.

### 4.3. Sédimentation

Au total, 37 tests de sédimentation ont été menés, sur 7 objets, impliquant deux types de granulométries. Les résultats sont synthétisés par la mesure de l'export total, en proportion massique de la quantité de sédiments apportés. La Figure 36 compare les valeurs mesurées aux exports estimés à l'aide de la relation proposée par Dabney et al.

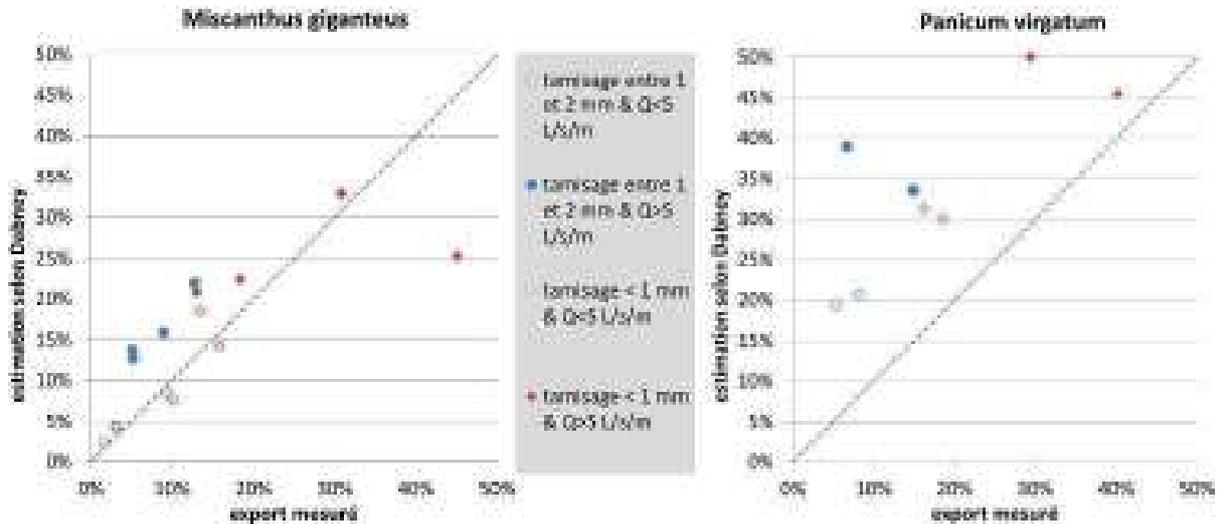


Figure 36 : exports de sédiments mesurés et estimés par la relation de Dabney et al. pour les miscanthus (à gauche) et les panics érigés (à droite), selon la granulométrie des sédiments et la gamme des débits

En première approximation, la relation proposée par Dabney et al. semble valable pour le miscanthus, et sous-estime l'efficacité de la sédimentation pour le panic érigé. Le *Miscanthus giganteus* étant un candidat intéressant pour les haies herbacées, cette relation sera donc utile.

Par ailleurs, l'aptitude à sédimenter se montre meilleure pour les sédiments de granulométrie grossière et pour les faibles débits. Les haies herbacées auront donc une meilleure efficacité sur la sédimentation lorsqu'elles se trouvent à proximité des sources de l'érosion, tout comme les fascines.

#### 4.4. Infiltration

La Figure 37 donne les valeurs d'infiltration à saturation mesurées en plein champ à un débit de 1 l/s/m. Neuf valeurs sont disponibles dans le cadre de cette étude, dont 6 sur miscanthus et 3 sur panic érigé. Elles vont de 0 à 500 mm/h, avec une médiane à 140 mm/h. Ces valeurs sont similaires à celles disponibles dans la littérature concernant l'infiltration de l'herbe.

Cependant, de par les surfaces mises en œuvre (généralement comprises entre 0,5 m<sup>2</sup> et 1,2 m<sup>2</sup>), ces essais n'étaient pas adaptés pour une mesure précise de l'infiltration. Au contraire, une série de mesures de l'infiltration a été menée par l'AREAS en collaboration avec la Chambre d'agriculture de Seine-Maritime en 2013 sur des objets similaires. Leurs résultats sont présentés sur la Figure 38. Ils confirment la proximité des infiltrations à saturation de ces objets avec celles de l'herbe.

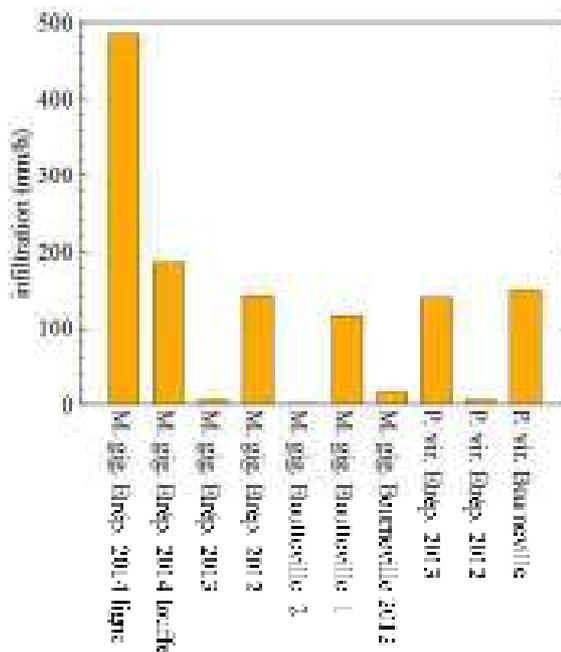


Figure 37 : infiltrations mesurées à 1 l/s/m

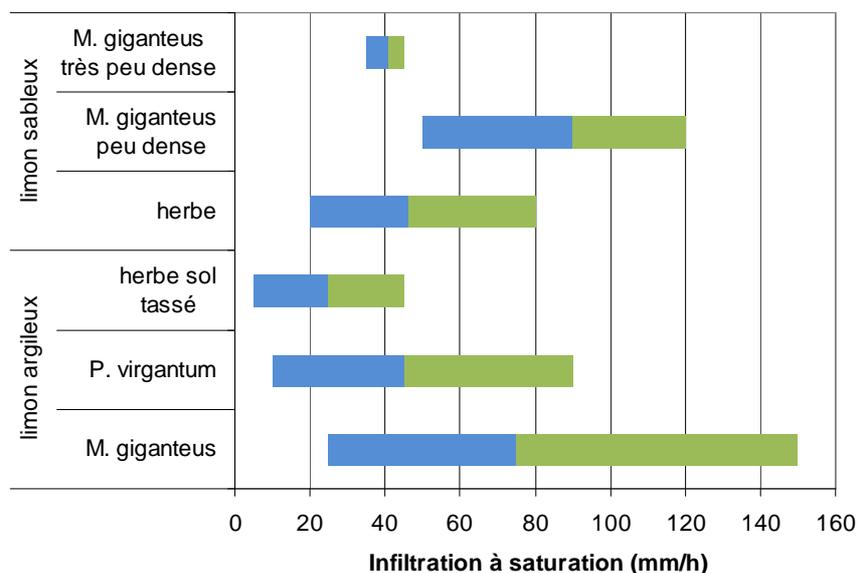


Figure 38 : infiltrations à saturation mesurées dans le cadre du projet bandes ligno-cellulosiques de la Chambre d'agriculture de Seine-Maritime en 2013 ; valeurs minimales, moyennes et maximales pour l'ensemble des mesures effectuées à un débit inférieur à 2 l/s/m.

## 5. Implantation et entretien

### 5.1. *Éléments issus de la bibliographie*

La source bibliographique abordant le mieux les aspects pratiques de l'implantation et de l'entretien est le *standard 601* (NRCS 2010). Elle précise les caractéristiques à respecter pour une haie rapidement efficace, quelque soit l'espèce retenue :

- elle doit être constituée d'au moins deux lignes, pour une largeur totale d'environ 1 m ;
- sa longueur est telle que ses extrémités atteignent la cote du fond<sup>3</sup> + 0,5 m ;
- la densité de plantation ou de semis doit être telle que :
  - la haie est efficace à l'issue de la seconde saison végétative, et
  - l'espace entre touffes doit être inférieur à 8 cm au bout de la première saison.

Pour atteindre ces objectifs, les densités de plantation suivantes sont proposées :

- pas plus de 15 cm entre rhizomes ;
- pas plus de 30 cm entre containers.

Par ailleurs, pour maîtriser l'érosion le long d'un thalweg, il est recommandé d'avoir une dénivelée entre deux haies consécutives inférieure à 2 m.

### 5.2. *Implantation et entretien*

Nous avons effectué une visite d'étude en Alsace en juin 2013 où le *Miscanthus giganteus* est utilisé depuis plusieurs années en lutte contre le ruissellement et l'érosion. Les observations qui y ont été effectuées complètent donc les mesures effectuées sur moins de 1 m de large par des constats sur des objets *en vraie grandeur* et *en situation réelle*. Les résultats observés sont nets lorsque l'implantation des plantes est réussie, comme sur la photo de la Figure 39.

Sur cette parcelle située à Bitschoffen dans le Bas-Rhin, cultivée en monoculture de maïs, une rigole d'érosion était récurrente. Elle a disparu dès la première année d'implantation, en 2011, et les dépôts ont commencé à être observés à partir de 2012. La largeur de la bande de miscanthus dans cette parcelle est de 12 m, et la récolte est valorisée dans une chaudière collective.

---

<sup>3</sup> La cote du fond doit être prise après avoir rebouché toute ravine ou rigole



**Figure 39 : un bout de champ sur la commune de Bittschoffen (67) planté en miscanthus en 2011, lors de notre visite en juin 2013 – les dépôts de sédiments sont visibles devant la personne.**

Dans cette région, la largeur d’implantation est toujours un multiple de 3 m. Un soin particulier doit être apporté à l’implantation et à l’entretien au cours des deux premières saisons :

- préparation du sol et destruction des adventices vivaces avant implantation ;
- désherbage chimique les deux premières saisons ;
- à partir de la troisième saison, l’entretien est nul.



**Figure 40 : une bande de miscanthus à vocation anti-érosive stricte, les tiges sèches des saisons précédentes sont encore en place**



**Figure 41 : rhizome sub-vertical dans une zone de dépôts**

Dans le cas de bandes de miscanthus avec une vocation stricte de lutte contre l’érosion, aucune récolte n’a été effectuée, sans gêne visible sur le développement des plantes (Figure 40).

Nous avons pu constater que les dépôts de sédiments ne gênaient pas l’émergence des tiges, et qu’ils étaient colonisés par les plantes (formation de rhizomes sub-verticaux, comme sur la Figure 41, où le doigt désigne l’un des yeux sur la partie récente du rhizome au sein des dépôts récents).

Sur l'un des sites visités, l'implantation a été ratée, notamment du point de vue du désherbage, et la bande de miscanthus se montre inefficace à réduire l'érosion.

Ces observations confirment que le fonctionnement souhaité des haies herbacées est possible à base de *Miscanthus giganteus*, à condition que l'implantation soit réussie. Cependant, elles n'ont pu concerner que des ruissellements du contexte alsacien, soit des ruissellements printaniers uniquement. On notera également la différence de climat, notamment les températures supérieures au cours de la saison végétative, et les largeurs d'implantation plus importantes que celle projetées dans le cadre de cette recherche.



## 6. Conclusion et perspectives

L'examen des usages des zones tampons en Haute-Normandie d'une part, et des aptitudes des haies herbacées anti-érosives selon la littérature d'autre part, a montré l'intérêt de ces dispositifs dans la lutte contre l'érosion en contexte agricole pour le nord de la France.

### 6.1. *Faisabilité*

**Nos résultats expérimentaux et nos observations permettent d'affirmer la faisabilité de haies herbacées anti-érosives en Haute-Normandie :**

- l'efficacité est similaire à celles trouvées dans la littérature malgré les différences climatiques pour plusieurs espèces, du point de vue du frein hydraulique comme de la sédimentation ;
- l'efficacité offerte par ces haies herbacées sera comparable à celle des bonnes fascines, pour un encombrement similaire ;
- l'infiltration de ces haies herbacées sera similaire à celle des dispositifs enherbés ;
- l'efficacité de la haie herbacée sera constante tout au long de l'année, notamment grâce à la présence d'une quantité importante de feuilles mortes et de débris végétaux de grandes dimensions enchevêtrés entre les tiges en place, qu'elles soient vives ou sèches.

De bons candidats ont été identifiés pour la constitution de ces haies herbacées. En l'état de nos connaissances, et par ordre d'efficacité décroissante :

- *Miscanthus giganteus* ;
- *Carex pendula* ;
- *Festuca mairei* ;
- *Panicum virgatum*.

### 6.2. *Perspectives*

Grâce à ces travaux exploratoires, la perspective de pouvoir mettre en œuvre des haies herbacées anti-érosives en Haute-Normandie est maintenant ouverte, et atteignable à court ou moyen terme.

Néanmoins, des investigations complémentaires apparaissent nécessaires pour parvenir à des recommandations techniques précises pour l'implantation et l'entretien de ces haies herbacées. Ces recommandations sont indispensables à la diffusion de cette technique sur le territoire Haut-Normand.

Parmi les perspectives à court terme, les 5 points suivants demandent à être examinés :

1. Dans le cadre de haies herbacées mono-spécifiques, qui a été le principal cadre exploré dans ces travaux, d'autres espèces mériteraient d'être testées, notamment des espèces locales, comme par exemple la baldingère (*Phalaris arundinacea*), ou d'autres espèces du genre *carex*.
2. L'intérêt de haies herbacées doubles, abordé au § 4.1.6, mériterait d'être approfondi.
3. Des haies pluri-spécifiques, semées ou plantées en mélange, pourraient présenter d'autres avantages, notamment du point de vue de la biodiversité et de la résilience : un travail à part entière serait nécessaire pour définir ces mélanges et en évaluer l'efficacité sur l'érosion et sur la biodiversité dans le cadre d'un suivi pluriannuel. Ce travail pourra faire l'objet d'une thèse encadrée par l'unité de recherche HydrISE de l'institut polytechnique LaSalle-Beauvais.
4. Des haies herbacées en vraie grandeur et en situation réelle doivent maintenant être implantées et suivies afin de parvenir à des recommandations techniques précises pour réussir l'implantation de ces dispositifs et garantir leur efficacité tout au long de leur existence. Ces suivis permettront de répondre à des questions comme :
  - a. Au bout de combien de temps la haie herbacée est-elle efficace ? Faut-il la protéger de l'érosion pendant cette période ?
  - b. Quelle est la tolérance des plantes à de longues périodes en sol saturé, comme cela pourrait se produire au point bas des haies au cours de longs épisodes pluvieux hivernaux ?
  - c. Quelle intégration au sein de l'agro-écosystème (diffusion dans les parcelles cultivées ou au-delà, résistance aux herbicides, effet sur les ravageurs des cultures) ?
5. L'analyse des effets de ces objets sur l'infiltration des eaux pluviales, la biodiversité et la vie du sol.

Ces investigations complémentaires pourraient nécessiter trois à quatre années pour être menées à bien, et commencer la formation des acteurs de terrain pour la diffusion de la technique des haies herbacées anti-érosives.

## Bibliographie

ALBERTS, E. E., KRAMER, L. A., GHIDEY, F. et FLANAGAN, D. C., 2001. Sediment deposition within a watershed with stiff-stemmed grass hedges. In : *Soil erosion research for the 21st century. Proceedings of the International Symposium, Honolulu, Hawaii, USA, 3-5 January, 2001*. [en ligne]. Honolulu, Hawaii, USA : American Society of Agricultural Engineers. janvier 2001. pp. 167–170. [Consulté le 10 mars 2014]. Disponible à l'adresse : <http://www.cabdirect.org/abstracts/20013035816.html>

AREAS, 2014. BD CASTOR. [en ligne]. 2014. [Consulté le 10 mars 2014]. Disponible à l'adresse : <http://www.bdcastor.fr/>

DABNEY, S. M., LIU, Z., LANE, M., DOUGLAS, J., ZHU, J. et FLANAGAN, D. C., 1999. Landscape benching from tillage erosion between grass hedges. *Soil and Tillage Research*. 1999. Vol. 51, n° 3, pp. 219–231.

DABNEY, S. M., MEYER, L. D., HARMON, W. C., ALONSO, C. V. et FOSTER, G. R., 1995. Depositional Patterns of Sediment Trapped by Grass Hedges. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 1995. Vol. 38, n° 6, pp. 1719-1729.

DABNEY, S. M., SHIELDS, F. D., TEMPLE, D. M. et LANGENDOEN, E. J., 2004. Erosion process in gullies modified by establishing grass hedges. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 2004. Vol. 47, n° 5, pp. 1561-1571.

DABNEY, S. M., VIEIRA, D. A. N. et YODER, D. C., 2013. Effects of topographic feedback on erosion and deposition prediction. *Transactions of the ASABE*. 2013. Vol. 56, n° 2, pp. 727–736.

DUNN, G. H. et DABNEY, Seth M., 1996. Modulus of Elasticity and Moment of Inertia of Grass Hedge Stems. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 1996. Vol. 39, n° 3, pp. 947-952.

HUSSEIN, Janet, YU, Bofu, GHADIRI, Hossein et ROSE, Calvin, 2007. Prediction of surface flow hydrology and sediment retention upslope of a vetiver buffer strip. *Journal of Hydrology*. mai 2007. Vol. 338, n° 3-4, pp. 261-272. DOI 10.1016/j.jhydrol.2007.02.038.

LAGUN-BOUCHET, 2013. pépinière l'autre jardin. [en ligne]. 2013. [Consulté le 20 mars 2013]. Disponible à l'adresse : <http://www.pepiniereautrejardin.com/venteplantes/index.html>

MEYER, L. D., DABNEY, S. M. et HARMON, W. C., 1995. Sediment-trapping effectiveness of stiff-grass hedges. *Transactions of the ASAE*. 1995. Vol. 38, n° 3, pp. 809–815.

MEYER, L. D., DABNEY, S. M. et KEMPER, W. D., 2001. Designing research to improve runoff and erosion control practices: Example, grass hedges. In : *Sustaining the global farm: Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, May 24–29, 1999, Purdue University* [en ligne]. 2001. pp. 447–481. [Consulté le 10 mars 2014]. Disponible à l'adresse : <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb-old/isco99/pdf/ISCOdisc/SustainingTheGlobalFarm/P135-Meyer.pdf>

NRCS, 2010. *Conservation practice standard - vegetative barrier - code 601* [en ligne]. janvier 2010. USDA - NRCS - NHCP. Disponible à l'adresse : [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs143\\_026353.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs143_026353.pdf)

OUVRY, Jean-François, RICHEL, Jean-Baptiste, BRICARD, Olivier, LHÉRITTEAU, Mélanie, BOUZID, Mya et SAUNIER, Mathieu, 2012. *Fascines et haies pour réduire les effets du ruissellement érosif*.

ROOSE, Eric et FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 1994. *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)* [en ligne]. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Bulletin pédologique de la FAO, 70. ISBN 925203451X 9789252034513. Disponible à l'adresse : <http://www.fao.org/docrep/t1765f/t1765f00.HTM>

SOCIÉTÉ DES GENS DE LETTRES, 2013. Jardin ! l'Encyclopédie. [en ligne]. 2013. [Consulté le 20 mars 2014]. Disponible à l'adresse : <http://nature.jardin.free.fr/cadre2b.html>

SOUILLER, C., COQUET, Y., POT, V., BENOIT, P., RÉAL, B., MARGOUM, C., LAILLET, B., LABAT, C., VACHIER, P. et DUTERTRE, A., 2002. Capacités de stockage et d'épuration des sols de dispositifs enherbés vis-à-vis des produits phytosanitaires. *Étude et Gestion des Sols*. 2002. Vol. 9, n° 4, pp. 169–285. <http://www.afes.fr/egs.php>

THE WORLD BANK, 1990. 11596: *Vetiver grass : the hedge against erosion* [en ligne]. The World Bank. [Consulté le 10 mars 2014]. Disponible à l'adresse : <http://documents.banquemondiale.org/curated/fr/1990/02/439291/vetiver-grass-hedge-against-erosion> troisième édition 1990 première édition 1987

VIEIRA, Dalmo A. N. et DABNEY, Seth M., 2012. Two-dimensional flow patterns near contour grass hedges. *Hydrological Processes*. 15 juillet 2012. Vol. 26, n° 15, pp. 2225–2234. DOI 10.1002/hyp.8262.

Zone de rusticité, 2014. *Wikipédia* [en ligne]. [Consulté le 17 mars 2014]. Disponible à l'adresse : [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Zone\\_de\\_rusticit%C3%A9&oldid=98834487](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Zone_de_rusticit%C3%A9&oldid=98834487) Page Version ID: 98834487

## Annexes

**Annexe 1 : Caractéristiques des herbacées semblant pouvoir être utilisées en haie de par leur aspect visuel** (les cases colorées indiquent une non-conformité aux critères de sélection, décrits à la section 3.1.2 page 13.).

Graminées nom latin	nom commun	port	résistance des tiges	diamètre des tiges	densité de tiges	hauteur adulte (m)	type de sol et climat	zone climatique	autres remarques
<i>Arrhenatherum bulbosum variegatum</i>	fromentale, ivraie	touffe retombante	souple	0,2 cm	+	0,5 m	sol normal à sableux, sec à frais	4-6	
<i>Arundo donax</i>	Canne de provence	dressé	raide	1,0 cm	-	2 à 8 m	sol humide bien drainé, climat chaud	9-10	Peut être envahissante
<i>Avena candida</i>	Avoine vivace	touffe	souple	0,2 cm	+	0,4 à 1,4 m	sol bien drainé	4	à mettre en 1ère ligne d'une association
<i>Brachypodium pinnatum</i>	Brachypode penné	touffe	souple	0,2 cm	+	0,3 à 1 m	prairie sèche sous exploitée	très rustique	pas en pépinière
<i>Bromus erectus</i>	Brome	touffe	raide	0,3 cm	+	0,4 à 1,2 m	sol sec, calcicole		
<i>Calamagrostis epigeios</i>	calamagrostide terrestre	dressé	raide	0,5 cm	+	0,6 à 1 m	sol compact		
<i>Calamagrostis acutifolia</i>	Calamagrostide , Gourbet	dressé	raide	0,4 cm	+	1,3 à 1,5 m	sol drainé, frais à sec	7-9	
<i>Carex buchananii</i>	laiche de Buchanan	touffe retombante	souple		+	0,5 à 0,9 m	sol léger pas trop sec à frais	4-10	attention se ressème facilement
<i>Carex grayi</i>	laiche de gray	touffe retombante	raide	0,4 cm	+	0,5 à 1 m	sol frais à humide	4-6	
<i>Carex hirta</i>	laiche hérivée					0,1 à 0,7 m	milieu frais, eutrophe		traçant

Graminées nom latin	nom commun	port	résistance des tiges	diamètre des tiges	densité de tiges	hauteur adulte (m)	type de sol et climat	zone climatique	autres remarques
<i>Carex pendula</i>	Grande Laîche pleureuse	touffe retombante		1 à 3 cm	+	0,8 à 1,5 m	sol riche et humide	5-9	
<i>Carex testacea</i>	Laîche testacée	touffe retombante	souple	0,3 cm	+	0,5 à 0,75 m	sol drainé	7-10	
<i>Carex vesicaria</i>	laîche vésiculeuse	gazonnant	souple	0,2 cm	+	0,3 à 0,8 m	milieu riche et humide		
<i>Chasmanthium latifolium</i>		touffe	raide	0,2 cm	-	0,8 à 1,2 m	sol ordinaire, frais	5-6	
<i>Chondropetalum tectorum</i>	Chondropétale des toits, des murs	touffe évasée	souple	0,2 cm	+	1 à 2 m	sol sablonneux, frais		
<i>Cortaderia selloana</i>	Herbe de la Pampa	touffe retombante	raide	0,5 cm	+	2 à 3 m	indifférent		peut être envahissante sud France
<i>Dactylis glomerata</i>	Dactyle aggloméré, Pied de poule	touffe dressée	souple	0,2 cm	+	0,3 à 0,8 m	sol drainé et riche	5-9	à mettre en 1ère ligne d'une association ?
<i>Deschampsia cespitosa</i>	Canche cespiteuse	touffe	souple	0,2 cm	+	0,8 à 1,2 m	sol frais à humide		
<i>Eragrostis trichodes</i>	eragrostide	touffe	souple	0,1 cm	+	1,2 m	sol drainé		
<i>Erianthus ravennae</i>		touffe retombante	raide	0,4 cm	+	3 m	sol ordinaire, pas trop sec à frais		
<i>Festuca arundinacea</i>	fétuque faux roseau	touffe	souple	0,1 cm	+	0,7 à 1,5 m	sol frais à humide	4-10	à mettre en 1ère ligne d'une association ?
<i>Festuca gautieri</i>	fétuque de Gautier	gazonnant	souple	0,1 cm	+	0,25 m	sol léger, sec à modérément humide		à mettre en 1ère ligne d'une association ?

Graminées nom latin	nom commun	port	résistance des tiges	diamètre des tiges	densité de tiges	hauteur adulte (m)	type de sol et climat	zone climatique	autres remarques
<i>Festuca glauca</i> "Blue Fesure"	fétuque bleue	touffe	souple	0,1 cm	+	0,3 m	sol ordinaire, sec à modérément humide		à mettre en 1ère ligne d'une association ?
<i>Festuca valesiaca</i>	Fétuque du Valais	touffe	souple	0,1 cm	+	0,15 à 0,5 m	sol drainé	4-10	à mettre en 1ère ligne d'une association ?
<i>Festuca mairei</i>		touffe	souple	0,2 cm	+	0,6 m	sol drainant	7	
<i>Hierochloe odorata</i>	Herbe à bison, Houlque	touffe dressée	souple	1 cm (feuille)	+	0,3 à 0,7 m	sol frais	5-9	
<i>Hystrix patula</i>		touffe	souple	0,2 cm	-	0,8 m	sol ordinaire, frais		
<i>Imperata cylindrica</i> "Red Baron"	Herbe sanglante	touffe	raide	0,5 cm	+	0,5 à 1 m	sol riche, frais, bien drainé, plutôt acide	8-12	envahissante
<i>Juncus effusus</i>	Jonc diffus	touffe étalée	souple	0,3 cm	+	0,4 à 0,8 m	sol humide tempéré	4-10	
<i>Koeleria glauca</i>	Keulérie bleue	cousin compact	souple	0,2 cm	+	0,4 m	sol sec à modérément humide,		rustique
<i>Leymus arenarius</i>	blé azur	touffe	souple	0,2 cm	+	0,6 m	milieu dunaire	4	peut être envahissant
<i>Miscanthus x</i> <i>BSWJ 6749</i>		dressé	raide	0,4 cm	+	1,0 m		6-10	
<i>Miscanthus sacchariflorus</i>		dressé	raide	0,5 à 1 cm	+	0,8 m		6-10	

Graminées nom latin	nom commun	port	résistance des tiges	diamètre des tiges	densité de tiges	hauteur adulte (m)	type de sol et climat	zone climatique	autres remarques
<i>Miscanthus sinensis</i>	roseau de chine	dressé	raide	0,5 cm	+	1,3 m	sol ordinaire, pauvre, pas trop sec à frais	5-10	
<i>Miscanthus transmorrisonensis</i>		dressé	raide	0,5 cm	+	2,0 m		6-10	
<i>Molinia arundinacea transparent</i>	molinie bleue	touffe dressée	souple	0,3 cm	+	1,6 m	sol ordinaire sans trop de calcaire, pas trop sec à frais		un individu est seul forme des touradons
<i>Muhlenbergia ringens</i>		touffe retombante	souple	0,1 cm	+	0,5 m	sol sec ou frais ou humide		
<i>Panicum virgatum</i>	Panic érigé	dressé	raide	0,3 cm	+	1 à 1,6 m	sol moyennement fertile, frais à sec		
<i>Pennisetum alopecuroides</i>	herbe aux écouvillon	touffe évasée	souple	0,3 cm	+	0,5 à 0,8 m	sol sec ou frais, drainé	7-10	à mettre en 1ère ligne d'une association ?
<i>Phalaris arundinacea</i>	Baldingère faux roseau	dressé	raide	0,5 cm	+	1 à 1,5 m	sol ordinaire, frais à humide		
<i>Schizachyrium scoparium</i>		dressé	raide	0,2 cm	+	0,9 m	sol frais		
<i>Sorghastrum nutans</i>	herbe des indiens	dressé	raide	0,3 cm	+	1,2 m	tout sol		
<i>Spartina pectinata Aureomarginata</i>	Spartine	touffe retombante	raide	0,3 cm	+	1,5 m	sol profond humide à normal		
<i>Sporobolus heterolepis</i>		touffe	souple	0,1 cm	+	1,2 m	sol léger, pas trop sec à frais		

## Haies herbacées anti-érosives

Graminées nom latin	nom commun	port	résistance des tiges	diamètre des tiges	densité de tiges	hauteur adulte (m)	type de sol et climat	zone climatique	autres remarques
<i>Stipa</i>	stipe	touffe	souple	0,1 cm	+	0,5 m	sol bien drainé	7-10	
<i>Tripsacum dactyloides</i>	Herbe grama	touffe retombante	raide	0,5 cm	+	1 m			hybridation ac mais, densité?

**Annexe 2 : Caractéristiques des bambous semblant pouvoir être utilisés en haie de par leur aspect visuel**  
(les cases colorées indiquent une non-conformité aux critères de sélection, décrit à la section 3.1.2 page 13.).

Bambous Nom latin	nom commun	port et densité des tiges	diamètre moyen tige en cm	hauteur adulte en m	type de sol et climat	autres remarques
<i>Chimonocalamus</i>	Bambou aux 5 couleurs	grandes canes, peu dense	4 à 6	5 à 6		non traçant
<i>Dendrocalamus strictus</i>	Bambou mâle, de Calcutta	grandes canes, peu dense	3 à 8	5 à 15	sol pas trop humide	géant, non traçant
<i>Fargesia</i>		grandes canes, peu dense	3 à 4	4 à 6		non traçant
<i>Leptocanna chinensis</i>		grandes canes, peu dense	4 à 10	10 à 15		géant, non traçant
<i>Phyllostachys nuda</i>		grandes canes, peu dense	3 à 4	6 à 8	sol drainé	traçant
<i>Phyllostachys pubescent</i>		grandes canes, peu dense	15 à 20	15 à 28	sol riche	géant
<i>Phyllostachys sulfurea/ viridis</i>		grandes canes, peu dense	6 à 10	10 à 15	terrain argileux	géant
<i>Phyllostachys viridi- glaucescens</i>		grandes canes, peu dense	6 à 10	5 à 12	sol riche	moyen
<i>Pleioblastus shibuyanus 'Tsuboi'</i>		petit buisson, moyennement dense		1,5 à 2		nain
<i>Sasa latifolia</i>	Sasa à larges feuilles	buisson, moyennement dense	0,1 à 0,2	1,5 à 2	sol bien drainé	nain, peu traçant
<i>Sasa masamuneana</i>		coussin, moyennement dense	0,1 à 0,2	0,5 à 1,5	sol bien drainé	nain, peu traçant
<i>Sasa tessallata</i>		gros buisson, moyennement dense	1 à 2	1,5 à 2	sol bien drainé	traçant
<i>Schizostachyum</i>		grandes canes, peu dense	5 à 8	13 à 18		géant, non traçant
<i>Shibatae kumasasa</i>	Bambou à feuille de Ruscus	petit buisson, moyennement dense		0,5 à 1,8	sol frais, bien drainé, non calcaire	nain, rampant, peu traçant

**Annexe 3 : Description des plantes en mottes acquises auprès de la pépinière *l'autre jardin* telle que trouvée dans leur catalogue en ligne (Lagun-Bouchet 2013)**

*Calamagrostis x acutiflora karl foester*

Le plus connu des Calamagrostis. Son port très droit ainsi que ses chaumes toujours présents l'ont rendu célèbre. Plante facile de longue vie. Fleurs dès la fin du printemps. Très florifère.

Tout type de sols, soleil à mi-ombre.

Rusticité : -25°

Fleurs : 180 cm Feuilles : 60 cm



*Miscanthus sinensis afrika*

Se colore dès l'été de rouge orangé.

Fleur argentée précoce, dès la fin juillet.

Fleurs : 150 cm

Feuilles : 70 cm



Miscanthus transmorrisonensis

Touffe forte serrée, de feuilles assez étroites, vert soutenu, enrubanées. Surprenants boutons floraux rouge écarlate faisant penser à des chenilles processionnaires. Les fleurs sortent « gaufrées » de couleur dorée sur de longues hampes graciles en août. Puis elles s'allongent de façon spectaculaire. Une des plus belles fleurs de miscanthus. Le feuillage a la particularité de rester vert très tardivement (souvent jusqu'à janvier dans le nord de la France.).

Origine : Taïwan

Rusticité : -25° Fleurs : 200 cm Feuilles : 100 cm



Miscanthus x BSWJ 6749

Une espèce de miscanthus découverte il y a peu de temps sur la montagne Hohuanshan (3200 m) à Taiwan. Enfin une herbe de taille intermédiaire tout à fait persistante. Nous la cultivons depuis 2007 et elle a connu des températures allant jusqu'à -20° c et des périodes de gel continu de plus de 5 semaines. Touffe vert soutenu, feuilles assez larges. Fleurs précoces début juillet argentées. Soleil à mi ombre.

Origine : Taiwan

Rusticité : -25° Persistant

Fleurs : 150 cm

Feuilles : 100 cm



Miscanthus sacchariflorus

Plante rhizomateuse de bonne croissance. Touffe lâche de feuilles vertes larges et souples. Fleur très lumineuse, argentée assez large en août. Belle décoloration des feuilles dans les tons orangés, dès la fin de l'été.

Origine : Asie de l'est

Rusticité : -25°

Fleurs : 160 cm

Feuilles : 80 cm



*Miscanthus sinensis roland*

Grande plante, grande feuille, grande fleur !!  
Feuille devenant rouge orangé en automne.  
Fleur rose foncé en août, restant lumineuse en hiver.

Fleurs : 250 cm

Feuilles : 150 cm

*Panicum virgatum northwind*

Touffe érigée de larges feuilles bleues. Raide et toujours droit. Fleurs roses. Très résistant à la sécheresse et insensible à la rouille.  
Feuillage jaune à l'automne. Garde sa forme en hiver. Tout sol mais au soleil.

Rusticité : -25°

Fleurs : 180 cm

Feuilles : 120 cm

*Panicum virgatum thundercloud gary trucks'*

Un des plus hauts panicums. Feuilles glauques, fleurs roses. Se tient très droit. Idéal pour réaliser des haies ou des fonds

Rusticité : -30°

Fleurs : 180 cm Feuilles : 160 cm



*Panicum virgatum rehbraun*

Feuilles vertes devenant brun rougeâtre en automne. Soleil à mi-ombre

Rusticité : -25°  
Fleurs : 160 cm  
Feuilles : 100 cm



*Carex pendula*

Répandu en Europe, c'est le plus grand Carex cultivé. S'adapte à toutes les conditions mêmes les plus extrêmes et à tous les sols. Il reste néanmoins intéressant pour sa floraison retombante et spectaculaire et sa persistance.

Origine : Europe, Asie, Afrique du nord  
Rusticité : -25° Persistant  
Fleurs : 180 cm  
Feuilles : 60 cm



*Festuca mairei*

Touffes serrées de feuilles assez larges glauques. Fine et légère floraison arquée paille dorée. Garde sa forme structurée en hiver. Soleil à mi-ombre, en sol drainant.

Origine : Atlas marocain  
Rusticité : -20° Persistant  
Fleurs : 80 cm  
Feuilles : 60 cm

