



INNOBIOMA

Programme de recherche
sur les Bandes Ligno-Cellulosiques

Capacités d'infiltration et de sédimentation
sous Saules (TTCR) et sous Miscanthus

M. SAUNIER
J.F. OUVRY
A. VERGER

Février 2018

Programme de recherche
avec la Chambre d'agriculture
de Seine-Maritime



Association de recherche sur le Ruissellement,
l'Erosion et l'Aménagement du Sol

www.areas.asso.fr

Remerciements

Les auteurs remercient toutes les personnes ayant contribué à cette étude :

- Les agriculteurs, Ludovic et Grégoire DUFOUR, Samuel BOUQUET, Elisabeth et Benoît LEFORESTIER.
- Bastien LANGLOIS de la chambre d'agriculture de Seine-Maritime.
- Les membres du comité de pilotage du programme INNOBIOMA

Cette étude n'aurait pu être réalisée sans le soutien des partenaires financiers que sont la Chambre d'agriculture de Seine-Maritime au premier plan, elle-même soutenue par l'Agence de l'Eau Seine Normandie pour ce programme, qu'ils en soient remerciés.

SOMMAIRE :

Remerciements.....	i
1. OBJECTIFS DE L'EXPERIMENTATION DE TERRAIN.....	1
1.1. Belleville-en-Caux	2
1.2. Biville-la-Baignarde	5
1.3. Sainte-Colombe	7
2. MATERIEL & METHODES.....	9
2.1. Le simulateur de ruissellement.....	9
2.1.1. Caractéristiques des placettes expérimentales	9
2.1.2. Connaissance bidimensionnelle des écoulements.....	10
2.1.3. Maîtrise des flux d'eau.....	12
2.1.3.1. Maîtrise des pertes latérales.....	13
2.1.3.2. Maîtrise des écoulements préférentiels	13
2.1.3.3. Précision de la mesure de débit.....	13
2.1.4. Choix des débits testés	14
2.1.5. Les données produites.....	15
2.1.5.1. Le ralentissement de l'écoulement créé par le couvert végétal	15
2.1.5.2. L'infiltration à saturation	15
2.2. Description des placettes.....	15
2.3. Evaluation de la capacité de rétention des sédiments par les modalités	16
2.3.1. Modélisation de la sédimentation en amont de haies : travaux de S. DABNEY	16
2.3.2. Choix des concentrations.....	18
2.3.3. Choix des granulométries des sédiments injectés	18
3. RESULTATS, ANALYSES & COMMENTAIRES PAR OBJECTIF :.....	20
3.1. Impact des Bandes Ligno-cellulosiques sur le ralentissement dynamique : Coefficient de Manning	20
3.2. Impact des bandes ligno-cellulosiques sur l'infiltration à saturation.....	24
3.3. Impact des bandes Ligno-cellulosiques sur la capacité à provoquer la sédimentation et réduire les transferts de MES :	28
4. MISE EN REGARD AVEC LES RESULTATS DE 2013 sur le site de Belleville en Caux.....	34
4.1. Évolution du ralentissement dynamique par frottement : Coefficient de Manning entre 2013 et 2017	34
4.2. Évolution de l'infiltration à saturation entre 2013 et 2017.....	36
4.3. Évolution de la capacité à provoquer la sédimentation entre 2013 et 2017 :.....	39
5 - Résultats et enseignements.....	41

1. OBJECTIFS DE L'EXPERIMENTATION DE TERRAIN

Préambule :

La réduction des ruissellements et de l'érosion des sols est une problématique majeure dans le département de la Seine-Maritime.

La Chambre d'agriculture de la Seine-Maritime et l'AREAS mènent depuis 30 ans, des actions de sensibilisation auprès des agriculteurs afin de faire évoluer les pratiques agricoles. L'objectif de ces actions étant de faciliter le déploiement des pratiques qui contribuent le plus efficacement à la réduction des risques de ruissellement sur les parcelles agricoles.

Parmi les mesures préconisées, les dispositifs enherbés de bords de champs ont montré toute leur efficacité dans la mesure où leur largeur est de l'ordre de 15 à 20 m. Néanmoins, ils présentent une faible valeur ajoutée et des débouchés économiques peu satisfaisants au regard de l'emprise foncière.

Dans ce contexte et pour offrir une solution qui allie performance dans la lutte contre le ruissellement et retombées économiques, de nouvelles voies sont à explorer notamment au niveau de la production de biomasse.

Historique :

Un premier programme de recherche, soutenu par l'AESN et le FEDER a été mené par la Chambre d'agriculture afin d'expérimenter la possibilité de remplacer les bandes enherbées par des Bandes Ligno-Cellulosiques (BLC). Ce programme ayant produit des résultats encourageants, il a été décidé de le poursuivre à travers un deuxième programme : INNOBIOMA.

INNOBIOMA examine la faisabilité technico-économique de tels dispositifs, d'organiser la filière, de vérifier l'efficacité dans la lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols et de définir les conditions à atteindre pour obtenir une bonne efficacité.

Objectif de cette étude :

Dans le cadre du programme INNOBIOMA, l'AREAS a réalisé une série d'expérimentations visant à acquérir des données sur le volet ruissellement et érosion.

Les données acquises dans le cadre de cette étude portent sur le volet ruissellements et l'érosion du programme INNOBIOMA :

Les paramètres recherchés sont ceux caractérisant les impacts des BLC sur le ruissellement, sur l'infiltration à saturation et sur le transfert des particules issues de l'érosion.

Les Bandes Ligno-Cellulosiques âgées de 6 à 7 ans qui ont fait l'objet de l'expérimentation, permettent d'obtenir des résultats qui reflètent les conditions en situation normale après plusieurs années de croissance et de récoltes (susceptibles de générer des tassements entre les lignes).

Les données obtenues dans le cadre de ces essais ont été comparées avec des essais similaires réalisés en 2003 sur ces mêmes BLC plus jeunes.

Les conditions des expérimentations :

Les expérimentations ont été réalisées sur 3 sites d'essais de bandes ligno-cellulosiques conduit par la Chambre d'agriculture :

- Belleville-en-Caux
- Biville-la-Baignarde
- Sainte-Colombe



Figure 1- Localisation des sites de Belleville-en-Caux et Mauquenchy

2. Les sites d'expérimentation

2.1. Belleville-en-Caux

L'expérimentation de bandes ligno-cellulosiques à Belleville-en-Caux est située sur la ferme du Tors, sur la fourrière en aval d'une parcelle agricole (Coordonnées GPS : N+49° 42' 28.48", E +0° 59' 43.94"). Les modalités testées ont été implantées en mai 2011.

Ce site pourra être nommé « B » dans le rapport.

Sur le bout de champ aval, les exploitants agricoles et la Chambre d'agriculture ont mis en place une succession de 4 modalités de bandes ligno-cellulosiques (BLC) :

2 modalités dites « témoins » :

1. **Herbe non tassée** jamais récoltée (absence de tassement) et **Herbe tassée**
2. **Saule/Herbe**, jamais récolté (absence de tassement) densité de 13 000 p/ha

2 modalités de BLC :

3. Miscanthus : 2 modalités

Une modalité récolté annuellement - densité de 9 000 p/ha - 32 % de surface couverte par le miscanthus 32 % - passage préférentiel estimé à 15 % sur les deux derniers mètres

Une modalité : Densité de 12 500 p/ha - 40 % de surface couverte par le miscanthus - passage préférentiel estimé à 30 % sur les deux derniers mètres.

4. **Saule sol nu dit « initial »**, récolté 3 fois depuis son implantation avec une densité de 16 000 p/ha. Un couvert herbacé a fini par se développer un peu et couvre environ 40 % de la surface totale. Cette modalité prendra donc le nom de « Saule sol nu initial » dans la suite de ce document.

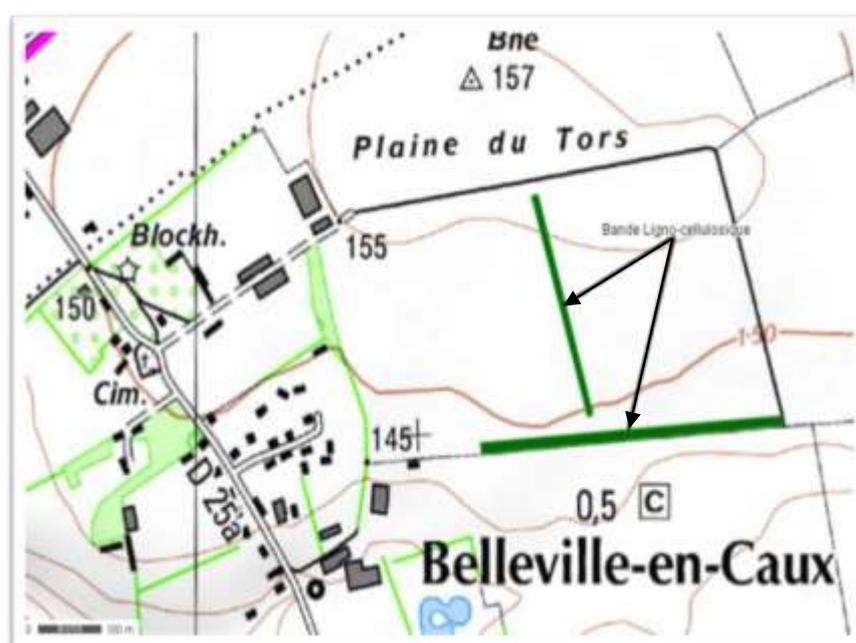


Figure 2 - Site de Belleville-en-Caux

Les expérimentations de ruissellement ont été réalisées avec un chenal de 6 m de long et 1 m de large dans le sens de la pente et perpendiculaire aux TCR (Taillis à Très Courte Rotation) sauf dans le cas des saules sol nu initial où les essais ont été implantés dans le sens des bandes de TCR.



Figure 3 - Miscanthus - Belleville en Caux

Sur ce site, les modalités « Herbe » et « Saule/Herbe » ont été implantées sur des sols limoneux battants profonds, développés sur des colluvions de limons.

Les modalités « Miscanthus » et « Saule Sol nu » ont été implantées sur des sols limoneux battants caillouteux peu épais, développés sur limons éoliens de faible épaisseur, sur une zone de bief à silex. Le « Saule sol nu » ayant été récolté peu de temps avant les essais, un peu d'herbe s'est développée sur le sol. Elle reste cependant éparse.

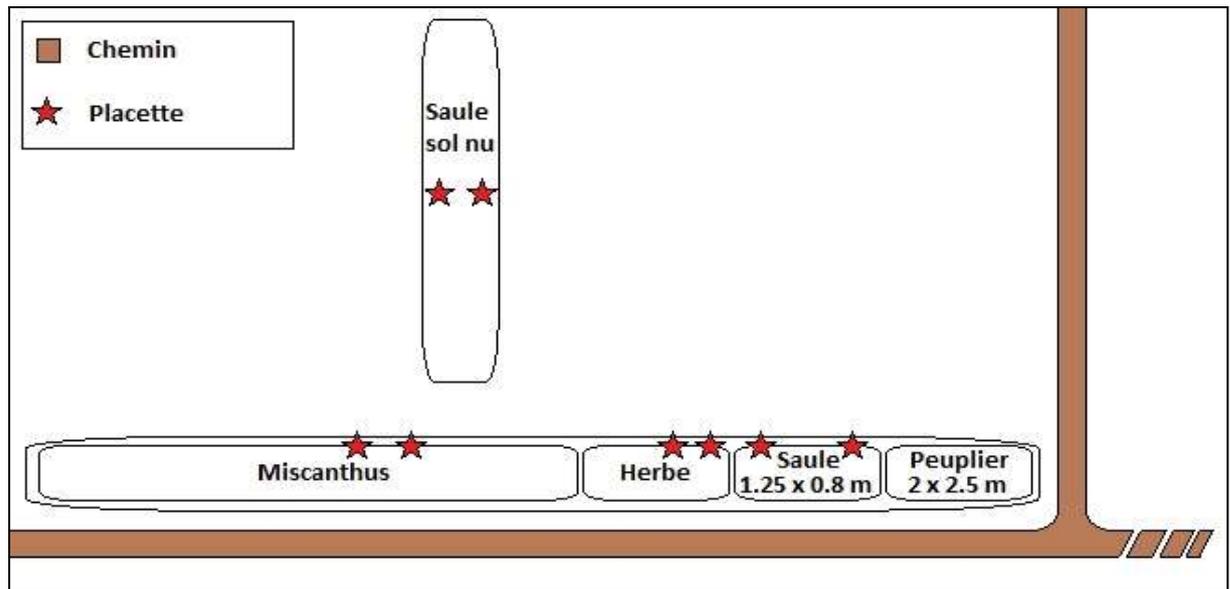


Figure 4 - Localisation des différentes placettes - Belleville-en-Caux



Figure 5 - Saule sol nu initial - Belleville en Caux



Figure 6 - Saule/Herbe témoin - Belleville en Caux

1.2 Biville-la-Baignarde

L'expérimentation des bandes ligno-cellulosiques de Biville la Baignarde est située en limite de deux parcelles au sein de la ferme du Val. (Coordonnées GPS : N+49°42' 48.467'';E+ 1° 2' 1.229''). Ce site pourra être nommé « BIB » dans le rapport.

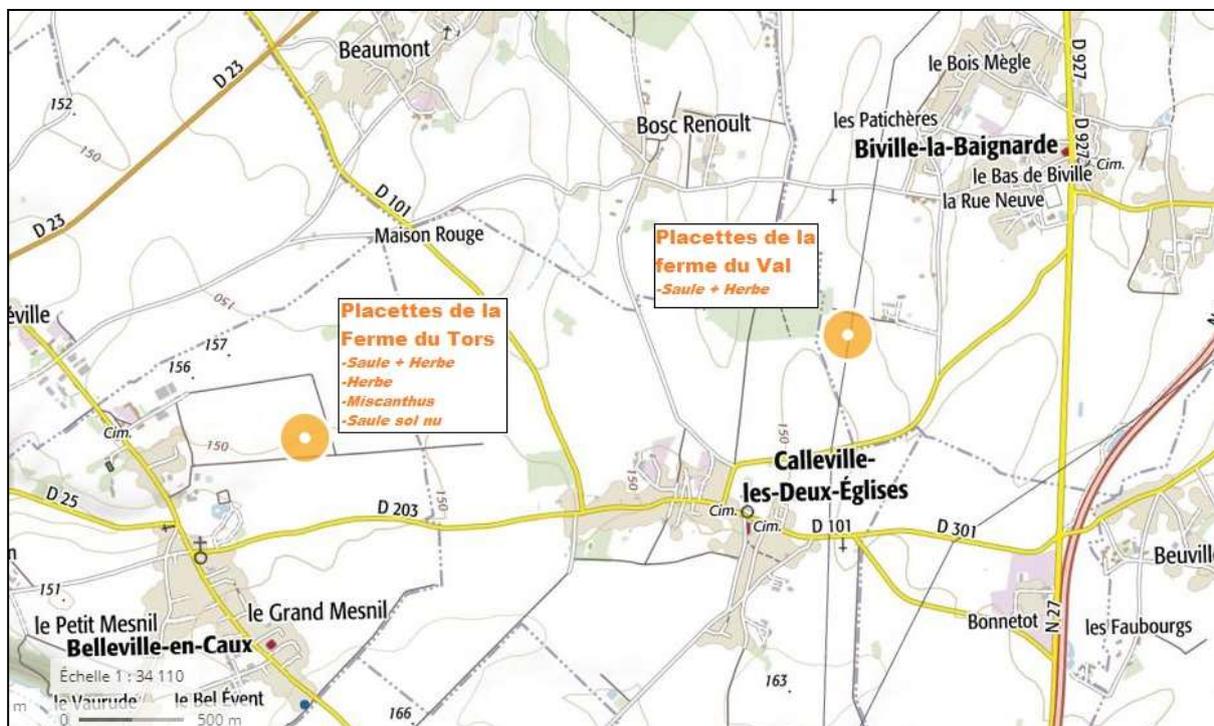


Figure 7 - Site de Biville la Baignarde

Sur cette limite de Parcelle l'agriculteur a mis en place une modalité de bandes ligno-cellulosiques (BLC) conduite en TTCR de saules enherbés :

1. **Saule/Herbe** : âgée de 3 ans et récoltée une fois. L'herbe a été implantée quelques mois après les saules.

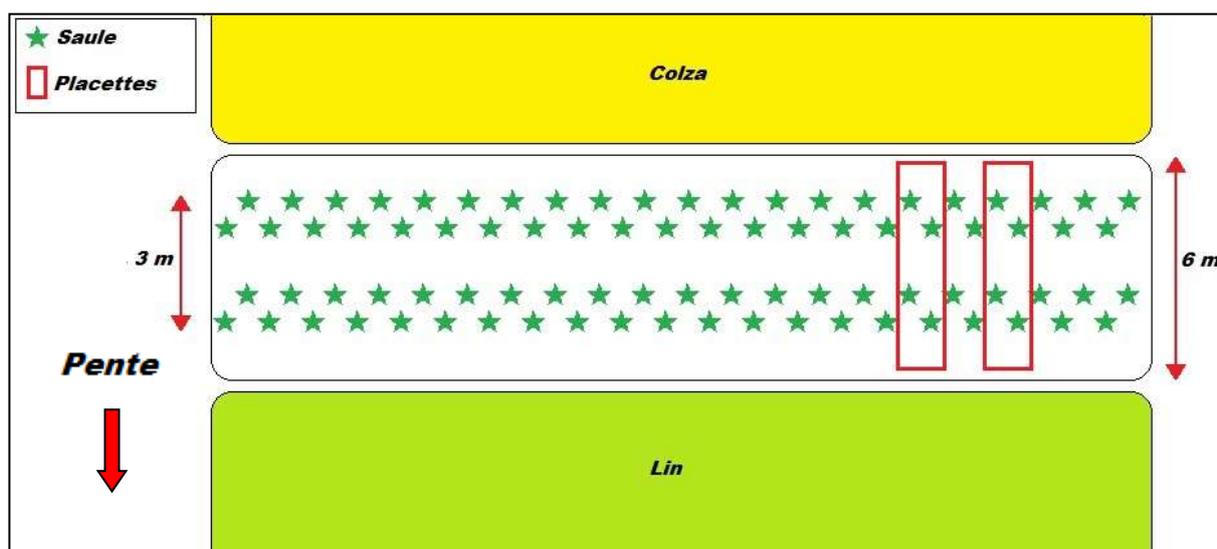


Figure 8 - Localisation des différentes placettes - Biville la Baignarde

Sur cette modalité, les expérimentations de ruissellement ont été réalisées en implantant le même chenal de 6 m de long et 1 m de large dans le sens de la pente et perpendiculairement au bande de TTCR (Voir schéma de localisation Figure 6).

Sur ce site, les modalités ont été implantées sur un limon peu épais.



Figure 9 - Saule/Herbe - Biville la Baignarde

2.3. Sainte-Colombe

L'expérimentation des bandes ligno-cellulosiques de Sainte Colombe est située sur un fond de vallon (en amont d'un ouvrage de rétention des eaux de ruissellement). Cette parcelle appartient à l'E.A.R.L du Moret (Coordonnées GPS N+ 49° 48' 17.989" : E+ 0° 44' 44.451"). Ce site pourra être nommé « StC » dans le rapport.



Figure 10 - Site de Sainte Colombe

Sur cette parcelle l'agriculteur a mis en place deux modalités de haies de saules enherbés :

1. **Herbe Tassée** : Modalité dite « Témoin » tassée par les récoltes des saules
2. **Saule/Herbe** : âgée de 5 ans et récoltée une fois.

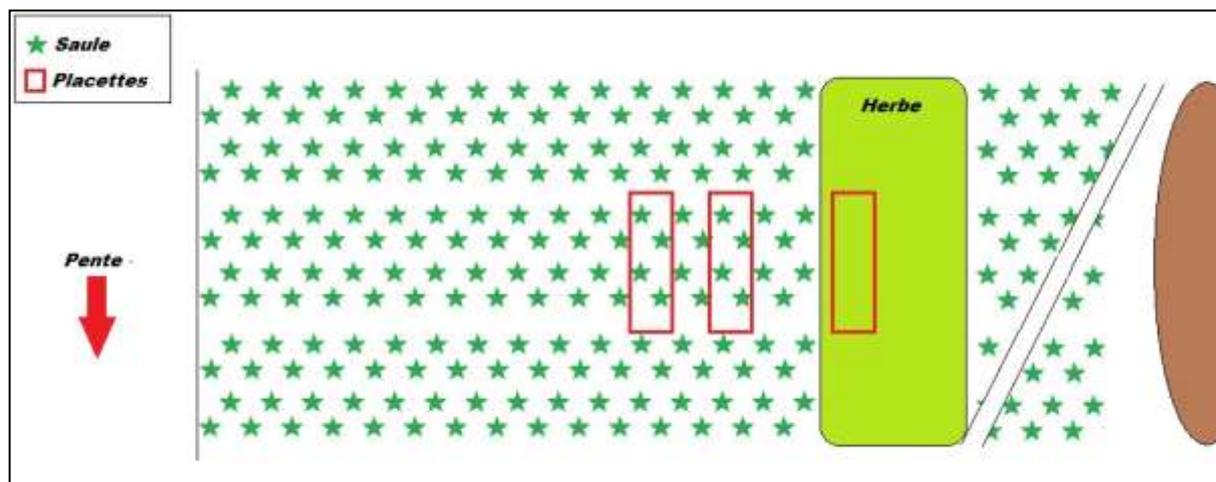


Figure 11 - Localisation des différentes placettes - Sainte Colombe

Sur cette modalité, les expérimentations de ruissellement ont été réalisées en implantant le même chenal de 6 m de long et 1 m de large dans le sens de la pente et perpendiculairement aux bandes de TCCR (Voir schéma de localisation Figure 7.

Sur ce site, les modalités ont été implantées sur des sols limoneux battants profonds, développées sur des colluvions de limons.



Figure 12 - Saule/Herbe - Sainte Colombe

3. MATERIEL & METHODES

Les essais ont consisté à réaliser des mesures d'écoulement sur le terrain, à travers des bandes ligno-cellulosiques en situation réelle de champ. Tous les essais ont été conduits avec un simulateur de ruissellement spécifique permettant de recréer un débit continu et connu, tant en entrée qu'en sortie. Ce chapitre présente l'ensemble du matériel mis en place à chaque essai et les mesures effectuées sur chaque expérience.

3.1. Le simulateur de ruissellement

Le simulateur de ruissellement est similaire à celui développé par le Cemagref, (SOUILLER et al, 2002). Sa conception légère permet de l'utiliser sur des sites naturels.

Il crée un ruissellement continu sur une largeur fixe (comprise entre 0,3 et 1 m) et sur une longueur de 6 m.

3.1.1. Caractéristiques des placettes expérimentales

Aucune correction de pentes n'a été effectuée lors de ces essais. La pente de l'expérimentation correspond donc à la pente du terrain naturel. Le tableau ci-dessous présente les pentes de chacune des modalités testées.

Modalités	Sites	Taux de couvert végétal vivant %	Pentes (%)	Tassement	Sol de Limons
Herbe = Témoin	Belleville en Caux	100	2.80	NON	Épais
	Belleville en Caux	100	2.66	OUI	Épais
	Ste Colombe	100	6.03	OUI	Épais
Miscanthus	Belleville en Caux	55	3.08	OUI	Peu épais
	Belleville en Caux	45	2.94	OUI	Peu épais
Saule sol nu initial	Belleville en Caux	35	2.20	OUI	Peu épais
	Belleville en Caux	50	2.36	OUI	Peu épais
Saule/Herbe	Belleville en Caux	90	1.93	NON	Épais
	Belleville en Caux	90	2.30	NON	Épais
	Biville	90	5.59	OUI	Moyennement épais
	Biville	90	4.59	OUI	Moyennement épais
	Ste Colombe	90	7.12	OUI	Épais
	Ste Colombe	90	5.51	OUI	Épais

3.1.2. Connaissance bidimensionnelle des écoulements

La surface testée (ou placette) correspond à une surface naturelle déterminée.

Elle est délimitée grâce à la pose d'un canal. Celui-ci est délimité par la surface naturelle au fond et la pose de tôles verticales dépassant de 40 à 50 cm du sol (Figure 13). L'écartement entre les tôles est variable, mais généralement réglé à 1 m. Les observations et les mesures des écoulements sont réalisées sur toute la longueur du chenal.

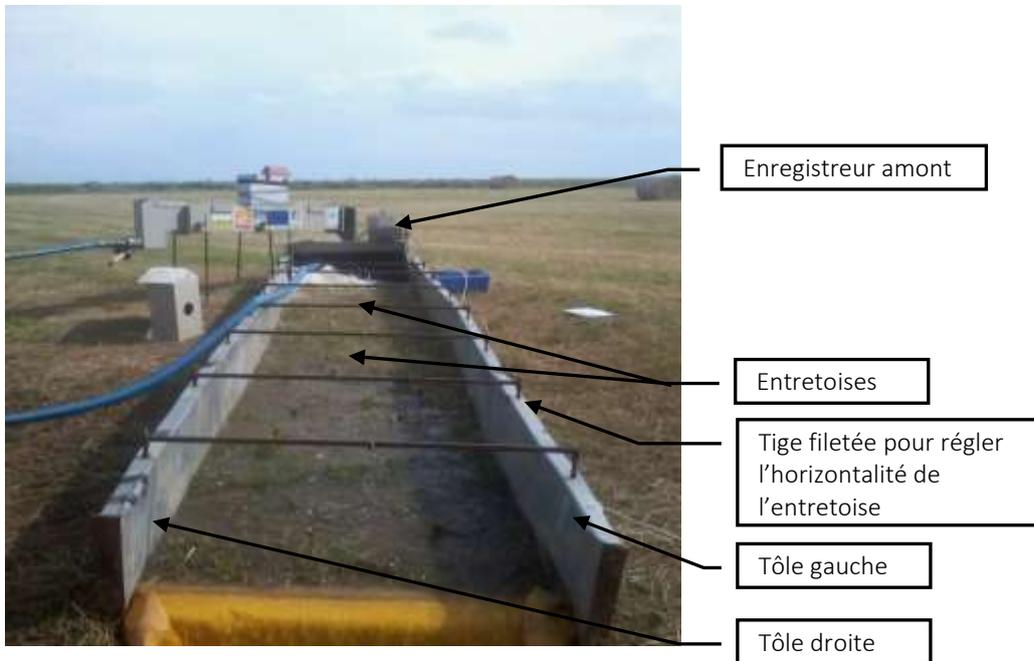


Figure 13 - Le canal de mesures, vue des entretoises

Une série d'entretoises disposées tous les 75 cm étaien le canal. Elles reposent sur des écrous permettant de régler leur niveau. Leur altitude relative est déterminée à l'aide d'un Théodolite. Au niveau de chaque entretoise (Figure 14), nous mesurons tous les 10 cm la hauteur de la lame d'eau avec une règle graduée. La microtopographie est ainsi déterminée (Figure 15).



Figure 14 - Lecture d'une hauteur d'eau sur une entretoise

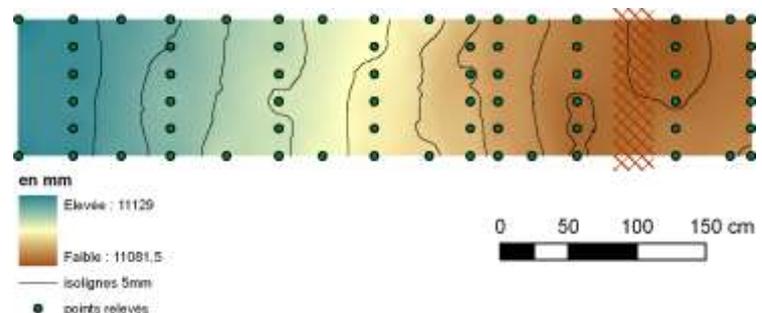


Figure 15 - Topographie de la placette de Neuville-Ferrières, points topographiques relevés et interpolation de la surface du sol

Pour chaque essai, les lignes d'eau sont mesurées à la verticale de chaque entretoise tous les 20 cm pour l'ensemble des débits étudiés.

Pour chacun des débits étudiés, après une phase d'imbibition de plusieurs dizaines de minutes, le débit d'entrée est maintenu constant. Les observations commencent lorsque le régime permanent est établi, après vérification sur l'enregistreur aval.

Les mesures portent sur les niveaux d'eau au droit de chaque entretoise tous les 10 cm.

La détermination de la hauteur d'eau moyenne des écoulements par transect (au droit de chaque entretoise) est ensuite calculée afin de pouvoir représenter le profil en long des écoulements en fonction des différents débits (Figure 16).

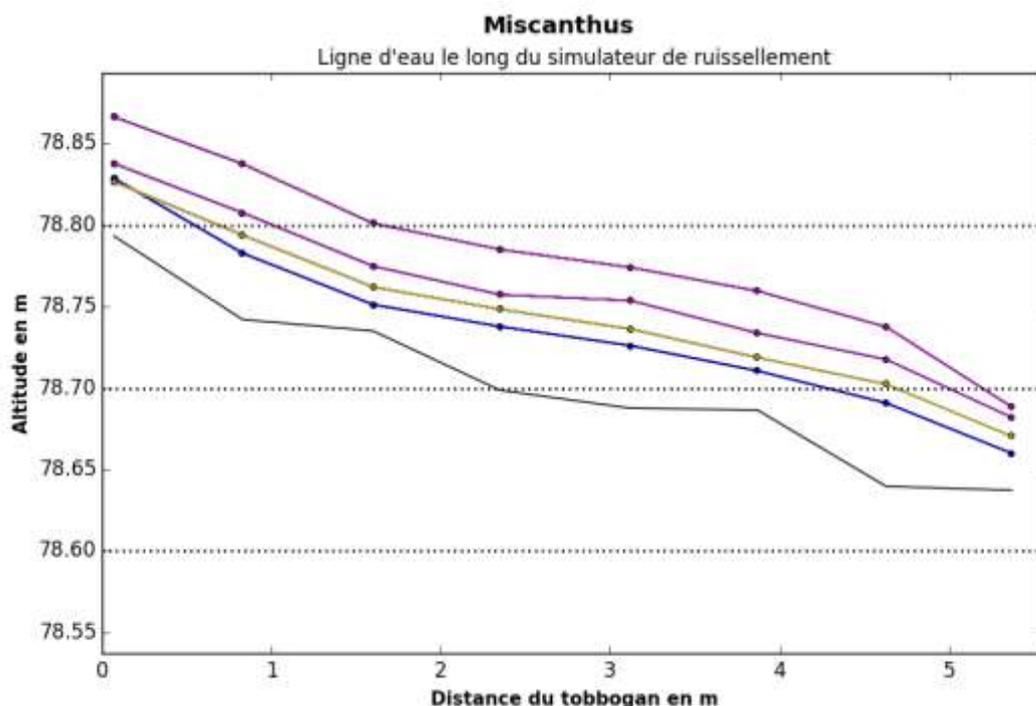


Figure 16 - Représentation du sol et des lignes d'eau en deux dimensions sur le miscanthus - Belleville en Caux

3.1.3. Maîtrise des flux d'eau

Les débits entrant et sortant de la placette sont mesurés en continu à l'aide de deux débitmètres (Figure 17). Il s'agit de canaux venturi à section exponentielle de 9 cm de large¹, équipés de capteurs à ultrasons pour la mesure de la hauteur d'eau².

La hauteur d'eau est mesurée chaque seconde, et une moyenne est enregistrée toutes les dix secondes³. Pour chaque mesure, nous obtenons entre 10 et 100 points de mesure de débit avec une précision de plus ou moins 2.5 %.

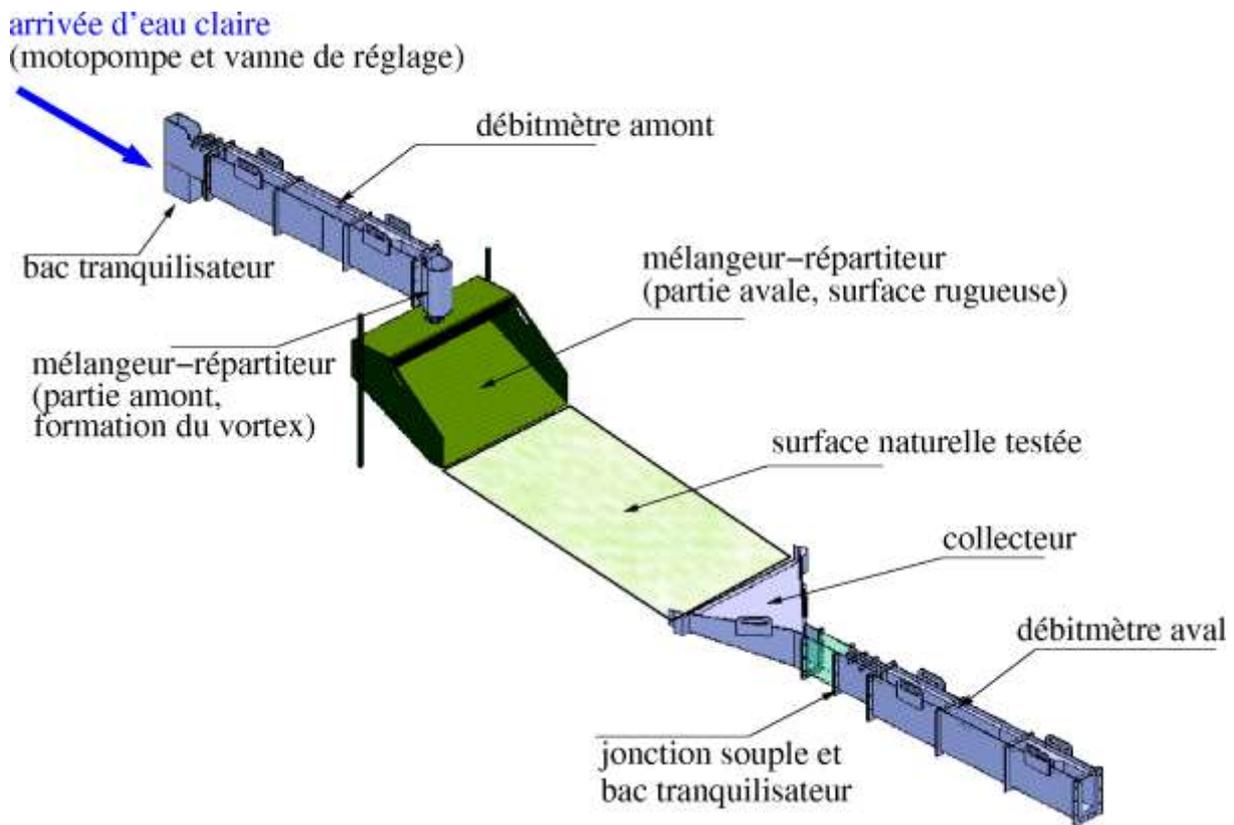


Figure 17 - Schéma des pièces du simulateur de ruissellement permettant la circulation de l'eau autour de la surface naturelle testée

L'eau est utilisée en circuit fermé à l'aide d'un réservoir et de deux motopompes. La première alimente le débitmètre amont et la deuxième refoule l'eau depuis une fosse creusée à la sortie du débitmètre aval vers le réservoir (Figure 18).

10 à 30 m³ d'eau sont nécessaires par site, en fonction de l'importance des pertes par infiltration à saturation.

Le débit d'entrée est réglé à l'aide d'une vanne et du régime moteur de la motopompe amont. Ce dispositif permet d'obtenir une stabilité satisfaisante du débit amont.

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

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

³ Sur un débitmètre électronique DLK102, fabriqué par ISMA

Dans le cadre de ces essais, la largeur du chenal étant toujours très proche de 1 m, les 4 débits testés varient de 0.5 L/s/ml à 6 L/s/ml.

L'ensemble « mélangeur – répartiteur » dessiné par le Cemagref d'Antony (Yves NEDELEC) assure une répartition homogène du flux d'eau sur toute la largeur de la placette, en même temps qu'un brassage (Dispositif complet Figure 18).

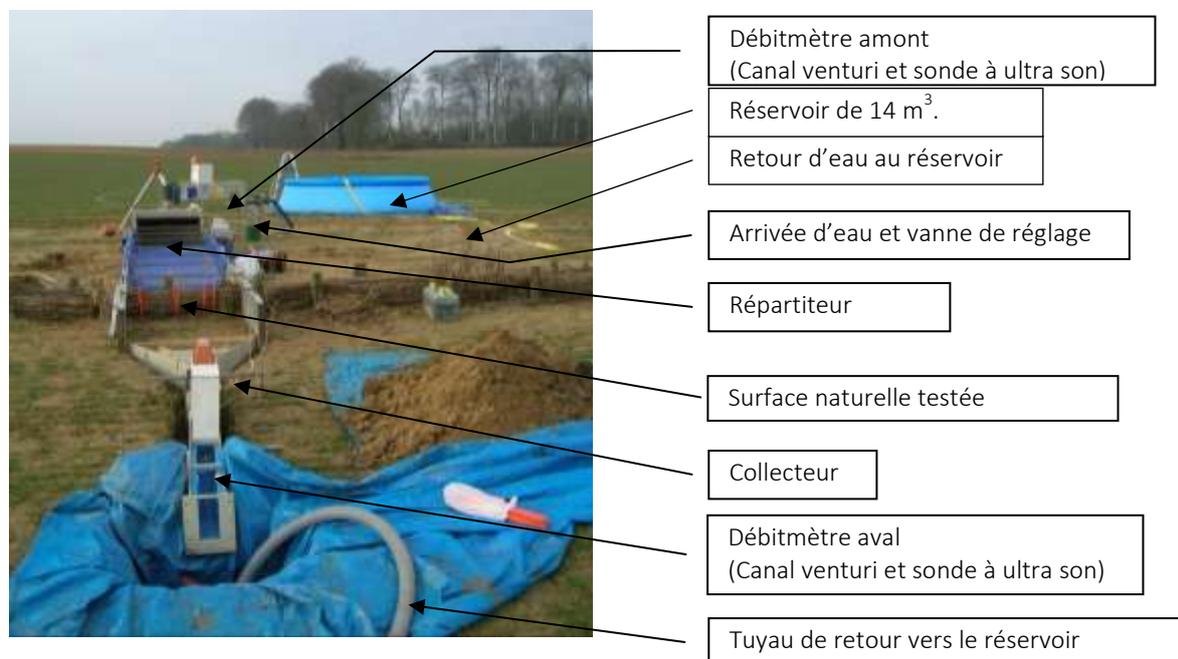


Figure 18 - Dispositif complet du simulateur de ruissellement (Saint-Gilles-de-la-Neuille, 2011)

3.1.3.1. Maîtrise des pertes latérales

Pour que les observations soient les plus représentatives possibles, un soin particulier est porté à l'étanchéité des bordures latérales du canal, afin de limiter les pertes d'eau.

Les bordures latérales sont enfoncées de 10 cm au minimum et jusqu'à 15 cm sur la partie aval. Un ajout de terre est réalisé le long du côté externe du canal. A l'intérieur du canal, l'étanchéité est assurée par un pansement d'argile gonflante (bentonite).

Les éventuelles entrées de galeries creusées par des mammifères sont obstruées par des bouchons de terre et d'argile gonflante.

3.1.3.2. Maîtrise des écoulements préférentiels

Afin d'éviter les écoulements préférentiels qui peuvent avoir lieu le long des tôles au contact du Miscanthus, ceux-ci ont été colmatés.

3.1.3.3. Précision de la mesure de débit

Les débitmètres amont et aval sont constitués d'un ensemble de capteurs à ultrasons et de canaux Venturi à section exponentielle. Ces capteurs ultrasons mesurent une hauteur d'eau qui est convertie en une valeur de débit. La relation liant la hauteur mesurée (h en m) et le débit (Q en m^3) est de type $Q = K \cdot h^n$ où K et n sont des constantes.

Les capteurs ultrasons mesurent avec une incertitude de $\pm 0,2\%$ pour une pleine échelle de 629 mm, ce qui correspond à une incertitude max de $\pm 1,258$ mm par capteur.

La conversion des hauteurs d'eau en débit est réalisée grâce à la courbe d'étalonnage du constructeur et le tarage réalisé sur le terrain.

Une fourchette d'incertitude est de l'ordre de 5 % sur les débits mesurés (Figure 19).

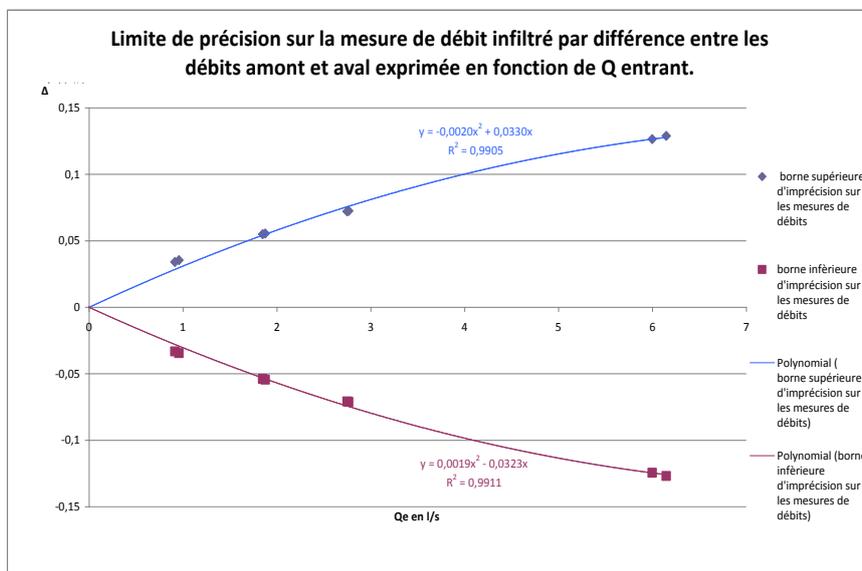


Figure 19 - Fourchette d'incertitude sur les valeurs de débit infiltré en fonction du débit entrant

L'estimation des vitesses d'infiltration à saturation est réalisée pour des faibles débits : $\leq 2,0$ L/s/ml afin que les différences $Q_e - Q_s$ soient suffisamment grandes par rapport aux incertitudes liées aux capteurs ultrasons.

3.1.4. Choix des débits testés

Chaque placette est soumise à saturation à 4 débits spécifiques afin de répondre aux 2 caractéristiques recherchées :

- **Mesures d'infiltration à saturation**, les débits retenus sont compris entre 0.5 et 2.0 L/s/ml. Ils permettent une bonne précision et assurent une différence significative entre débit amont et aval pour calculer les valeurs d'infiltration à saturation.

La placette est mise en eau le temps d'atteindre une différence de débits stable entre l'amont et l'aval. Cette durée est comprise entre 3 et 15 minutes. Le débit suivant n'a lieu qu'après ressuyage complet de la parcelle entre 10 et 15 minutes.

- **Pour les mesures de frein hydraulique**, les 2 débits retenus sont 2 L/s et 6 L/s.

Cette gamme de débits permet de minimiser les effets de la topographie fine de la parcelle et la rugosité des parois du canal. Elle permet d'obtenir un coefficient de Manning relativement stable.

3.1.5. Les données produites

Le matériel utilisé permet d'obtenir deux types de données pour chacune des modalités :

- Le ralentissement de l'écoulement par le couvert végétal
- L'infiltration à saturation

3.1.5.1. Le ralentissement de l'écoulement créé par le couvert végétal

Ce frein à l'écoulement est traduit par un paramètre unique : le coefficient de Manning « n » obtenu à partir de l'équation de Manning Strickler.

$$Q = \frac{1}{n} \times S \times Rh^{2/3} \times i^{1/2}$$

$$n = \frac{S \times Rh^{2/3} \times i^{1/2}}{Q}$$

Avec :
S : Section mouillée en m² (=L*h dans le cas d'un chenal rectangulaire)
Rh : Rayon hydraulique en m (= L+2h)
i : pente en m/m
Q : débit en m³/s
n : coefficient de Manning en L^{-1/3}.T
L : largeur de l'écoulement en m
h : hauteur de la lame d'eau devant l'obstacle en m.

La comparaison des valeurs de ce coefficient par rapport à un couvert témoin permet de classer l'impact de chaque type de modalité.

3.1.5.2. L'infiltration à saturation

Pour obtenir des résultats fiables et comparables, le sol du chenal a été amené à saturation en eau en laissant couler l'eau pendant tout le temps nécessaire.

L'infiltration à saturation est obtenue en calculant la différence entre le débit entrant et le débit sortant. Elle est ensuite ramenée à l'unité de surface (m²).

A noter : Il existe un effet de bulbe sous le chenal. De ce fait, les infiltrations à saturation ne sont pas strictement verticales. Les résultats de mesure d'infiltration peuvent être légèrement surestimés.

3.2. Description des placettes

Les placettes sur lesquelles sont effectuées les mesures sont caractérisées par :

- La pente naturelle du terrain d'origine
- La largeur de 1 m
- La longueur maximale permise par le simulateur de ruissellement
- Un couvert végétal exprimé en %.

La surface de mesure comprise entre 5.6 et 5.8 m² permet d'intégrer une part de l'hétérogénéité spatiale des états de surface.

Si la placette le permet, l'exutoire du chenal est placé à l'aval immédiat d'une touffe permettant le calcul du frein hydraulique (touffe suffisamment dense et dont la largeur est identique à celle du canal). Ce fut le cas pour le Miscanthus.

3.3. Evaluation de la capacité de rétention des sédiments par les modalités

Dans la réduction des ruissellements et de l'érosion, le principal effet attendu de la part des bandes ligno-cellulosiques est le piégeage des sédiments issus des formes d'érosion linéaire. L'étude approfondie des phénomènes de sédimentation fait intervenir de nombreux paramètres (vitesses, taille des agrégats, densité, turbulences de l'écoulement, *etc.*), dont l'évaluation peut demander des dispositifs expérimentaux conséquents.

Suite aux résultats produits par l'AREAS en 2011 sur les haies et fascines, et vu la similitude des processus, le choix a été fait de se baser sur le modèle établi par S. Dabney afin de caractériser la capacité de rétention des bandes ligno-cellulosiques sur les matières en suspension, et cela pour les 13 modalités expérimentées.

3.3.1. Modélisation de la sédimentation en amont de haies : travaux de S. DABNEY

Les données bibliographiques sur la mesure *in situ* de l'impact de haies vis-à-vis de l'abattement de la charge solide des ruissellements sont peu nombreuses. Ce sont les haies herbacées qui ont fait l'objet des recherches scientifiques les plus précises.

Elles ont été très étudiées par le NRCS des Etats-Unis, par Seth DABNEY et son équipe. DABNEY *et al.* (1995) ont publié une étude très complète sur ce sujet. D'après leurs travaux de simulations de ruissellement à différents débits (10 à 45 L/s/ml), avec diverses concentrations en MES dans un chenal similaire à celui utilisé pour nos essais, ils montrent que le taux de sédimentation suit globalement l'Équation 1, avec les paramètres donnés dans le tableau 1. Il est à noter que la granulométrie considérée est la granulométrie apparente, ou granulométrie des agrégats, par opposition à la granulométrie des particules élémentaires d'un sol ou d'un sédiment.

$$\frac{C_{out,k}}{C_{in,k}} = \exp\left(\frac{-V_k \beta_k L}{q}\right) \quad \text{Équation 1}$$

avec k : Fraction granulométrique considérée

$C_{in,k}$: Concentration (g/l) par unité de largeur en sédiment arrivant à la haie pour la fraction granulométrique k

$C_{out,k}$: Concentration (g/l) par unité de largeur en sédiment sortant de la haie pour la fraction granulométrique k

V_k : Vitesse (m/s) de sédimentation des particules pour la fraction granulométrique considérée k

- L : longueur (m) de sédimentation, c'est-à-dire longueur de la zone d'eau calme, mesurée entre le ressaut hydraulique et la haie
 q : débit spécifique ($\text{m}^3/\text{s}/\text{ml}$) = débit par unité de largeur
 β_k : une constante dépendante de la fraction granulométrique considérée k

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

Tableau 1 : valeurs des paramètres de l'Équation 1

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

L'examen des valeurs du Tableau 1 montre que, pour un débit et une longueur de sédimentation donnés, l'efficacité varie fortement avec la granulométrie. La Figure 20, tirée de cette même publication, présente les prédictions théoriques de sédimentation selon la taille des agrégats et la longueur d'eau calme sur laquelle la sédimentation peut avoir lieu pour un débit donné de $5,5 \text{ L/s}/\text{ml}$ (ou $0,33 \text{ m}^3/\text{minute}/\text{ml}$).

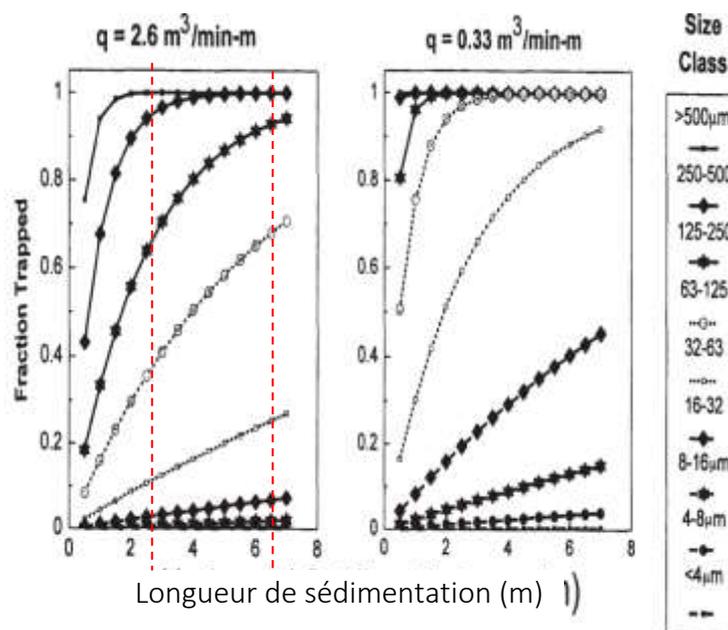


Figure 20- Prédiction de taux de sédimentation pour un débit de $0,33 \text{ m}^3/\text{minute}/\text{m} = 5,5 \text{ L/s}/\text{m}$ selon les équations de FLANAGAN *et al.* (1989) devant une haie herbacée, en fonction de la longueur de sédimentation, d'après DABNEY *et al.* (1995)

Sur cette figure, le débit spécifique de $5,5 \text{ L/s}/\text{ml}$ est similaire aux débits de nos expérimentations. Pour des longueurs de sédimentation comprises entre 1 m et 3 m (observées dans les essais précédents de l'AREAS), on peut regrouper les granulométries en trois classes :

- classe des agrégats sédimentant toujours à plus de 95 %, de diamètre supérieur à $125 \mu\text{m}$

- classe des agrégats présentant une sédimentation inférieure à 60 %, de diamètre inférieur à 63 µm
- classe des agrégats présentant une sédimentation intermédiaire, de diamètre compris entre 63 µm et 125 µm

La longueur de sédimentation étant très fortement liée à la pente de la modalité, nous avons dû pour pouvoir les comparer utiliser une pente unique de 3 %. A l'aide de la pente de 3 % et du coefficient de Manning calculé précédemment pour chaque modalité, nous avons pu déterminer la longueur du plan d'eau utilisée pour calculer les transferts de sédiments.

3.3.2. Choix des concentrations

Le choix des concentrations peut s'échelonner entre 7 et 28 g/L. Cela correspond à la fourchette haute des valeurs citées par O. CERDAN (2001), suite au recensement de 674 données mesurées sur la région du Pays de Caux, issues pour partie des travaux de LE BISSONNAIS *et al.* (1998) et de V. LECOMTE (1999). Les valeurs recueillies vont de 0,1 g/l à plus de 100 g/l. mais l'analyse statistique conduite par O. CERDAN, selon les conditions de couverture du sol et de développement des croûtes de battance, amène à proposer les moyennes indiquées dans le Tableau 2. Les valeurs proposées par O. CERDAN sont cohérentes avec celles observées dans les régions de grandes cultures en plateau limoneux du Pays de Caux par V. LECOMTE (1999) - de 0,9 à 23,8 g/l - et du nord de l'Europe par G. GOVERS (1985, 1991) et P. VAN DIJK (2001).

Stade de battance	Taux de couvert végétal	Rugosité	Nb de mesures	Concentration moyenne (g/l)	Ecart type
Tout stade confondu	0 – 20 %	> 10 cm	9	30,28	9,02
		5 - 10 cm	82	22,50	24,92
		1 - 5 cm	206	9,59	14,07
Croûtes sédimentaires	21 – 100 %	5 - 10 cm	52	9,69	14,92
		1 - 5 cm	185	4,04	6,22
		0 - 1 cm	83	1,15	2,44
	0 – 20 %	5 -10 cm	62	25,37	27,53
		1 -5 cm	166	11,04	15,49
		0 - 1 cm	26	5,99	12,95

Tableau 2 : concentrations moyennes dans les ruissellements en Pays de Caux selon les états de surface, d'après O. CERDAN (2001)

Nous avons choisi de retenir une gamme de concentrations moyennes avec des valeurs qui correspondent aux situations qui génèrent des charges solides fortes sans être maximales.

3.3.3. Choix des granulométries des sédiments injectés

Nous avons choisi d'utiliser 2 types de granulométries d'agrégats (courbes rouge et brune) pour un sol déjà utilisé préalablement par l'AREAS. Les courbes granulométriques de ce sol avec 2 types de tamisage sont présentées dans le graphique ci-dessous.

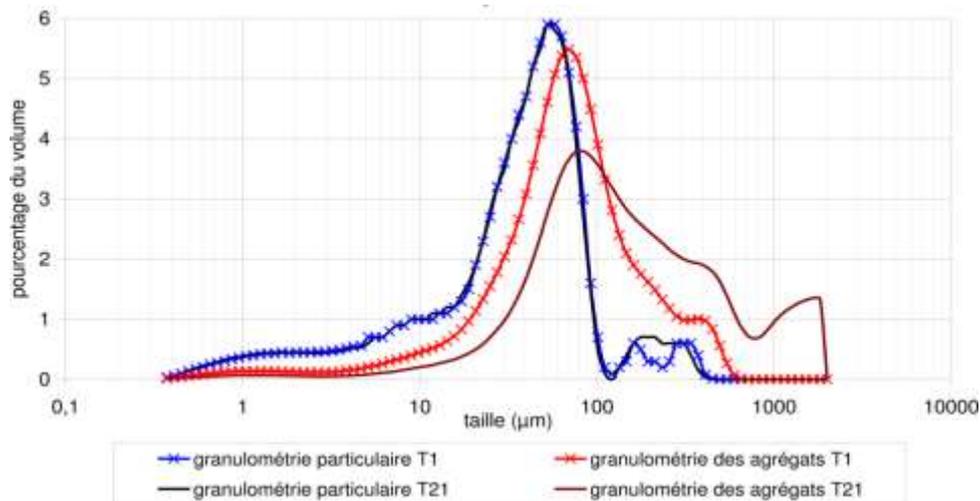


Figure 21 - Granulométrie détaillée du matériau source issu du sol N° 1 tamisé à 1 mm (T1) et tamisé entre 1 et 2 mm (T21).

Ces granulométries de matériaux utilisés ont été comparées pour validation avec une référence scientifique régionale, sachant que les méthodes d'analyses sur échantillons non traités diffèrent :

En 1999, V. LECOMTE a analysé les particules érodées sur des parcelles expérimentales de 54 m de long, conduites en culture de blé sur des sols de limons moyens sableux du Pays de Caux, semblables au sol utilisé (Tableau 3). Les analyses initiales soit de la couche superficielle, soit des particules transportées par le ruissellement, indiquent une granulométrie moins grossière que celle du sol tamisé à 1 mm. Mais ces résultats indiquent une granulométrie apparente relativement proche entre son analyse des MES d'un ruissellement et les mesures obtenues avec les agrégats du sol tamisé à 2 mm.

Résultats V. LECOMTE				Mesures de cette expérimentation		
classe de granulométrie	Horizon de surface (A)	Horizon de sous-jacent (B)	Proportion de Charge solide dans le ruissellement du 4/3/98	classe de granulométrie	Sol tamisé à 1 mm	Sol tamisé à 2 mm
> 50 µm	47,3%	40,8%	45,8%	> 52,6 µm	66,0%	42,3%
20 à 50 µm	33,3%	31,9%	29,2%	20,7 à 52,6 µm	23,5%	38,3%
10 à 20 µm	8,1%	8,9	8,5	9,8 à 20,7 µm	7,3%	9,6%
2 à 10 µm	7,6%	8,3%	9,6%	2 à 9,8 µm	3,4%	6,4%
0 à 2 µm	2,5%	5,4%	4,2%	0 à 2 µm	1,9%	3,4%

Tableau 3 - Comparaison de la granulométrie apparente des matériaux lors des travaux

Les résultats de V. LECOMTE confirment le bien-fondé de cette classe granulométrique de matériaux utilisés. Néanmoins, il semblerait que les autres tamisages aient augmenté la proportion de particules de taille supérieure à 50 µm.

4. RESULTATS, ANALYSES & COMMENTAIRES PAR OBJECTIF :

4.1. Impact des Bandes Ligno-cellulosiques sur le ralentissement dynamique : Coefficient de Manning

Comme expliqué au paragraphe 3.14, le ralentissement provoqué par le type d'occupation du sol peut être caractérisé par un paramètre unique, indépendant de la forme géométrique de l'écoulement et de la pente. Ce paramètre reflète les forces de frottement liées à la rugosité de surface. Il s'agit du coefficient de frottement de Manning-Strickler : n .

En principe, le débit influence peu les valeurs de ce coefficient dès lors qu'une gamme de débits homogène et assez significative est atteinte. Quand les débits sont particulièrement faibles, alors l'hétérogénéité de la surface du sol constitue un obstacle à l'écoulement, qui prime sur la nature de l'occupation du sol, et conduit à des valeurs très élevées du coefficient de Manning.

Pour chaque débit et chaque expérimentation, ces coefficients ont été estimés afin de comparer le comportement des différents couverts. L'ensemble des résultats détaillés est disponible au chapitre 6 pour chaque modalité.

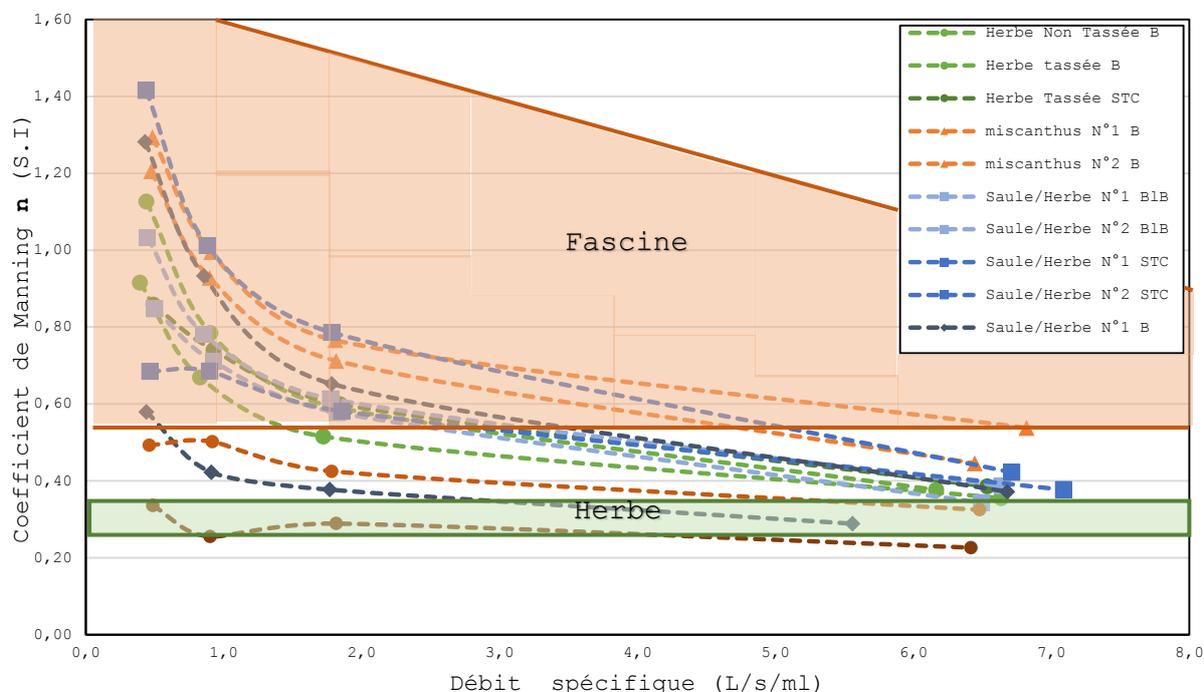


Figure 22- Coefficient de Manning des différentes modalités testées en fonction du débit spécifique.

Les résultats sont conformes à ceux obtenus dans la littérature scientifique. On constate qu'une série de points pour chaque modalité peut être scindée en deux parties distinctes :



Figure 23 - Illustration d'un débit inférieur à 2 L/s/ml dans la modalité Saule/Herbe à Biville la Baignarde

La partie comprise entre 0 et 2,00 L/s/ml correspond au faible débit engendrant une lame d'eau peu épaisse. Il y a dans cette partie une très forte décroissance (ou quelquefois une très forte augmentation) qui illustre l'influence de la topographie fine de la placette sur le frein hydraulique.

La partie supérieure à 2 L/s/ml représentée ici par le point à 6 L/s/ml forme une droite avec une légère pente négative qui reflète mieux la spécificité du frein hydraulique propre à la modalité testée. **C'est cette gamme de valeurs qui est utilisée pour comparer les couverts des différentes modalités.** Les fourchettes de valeurs obtenues et les valeurs retenues sont présentées dans le Tableau 4. Les valeurs correspondant au coefficient de Manning pour les débits de 6.00 L/s/ml sont présentées dans la Figure 24.

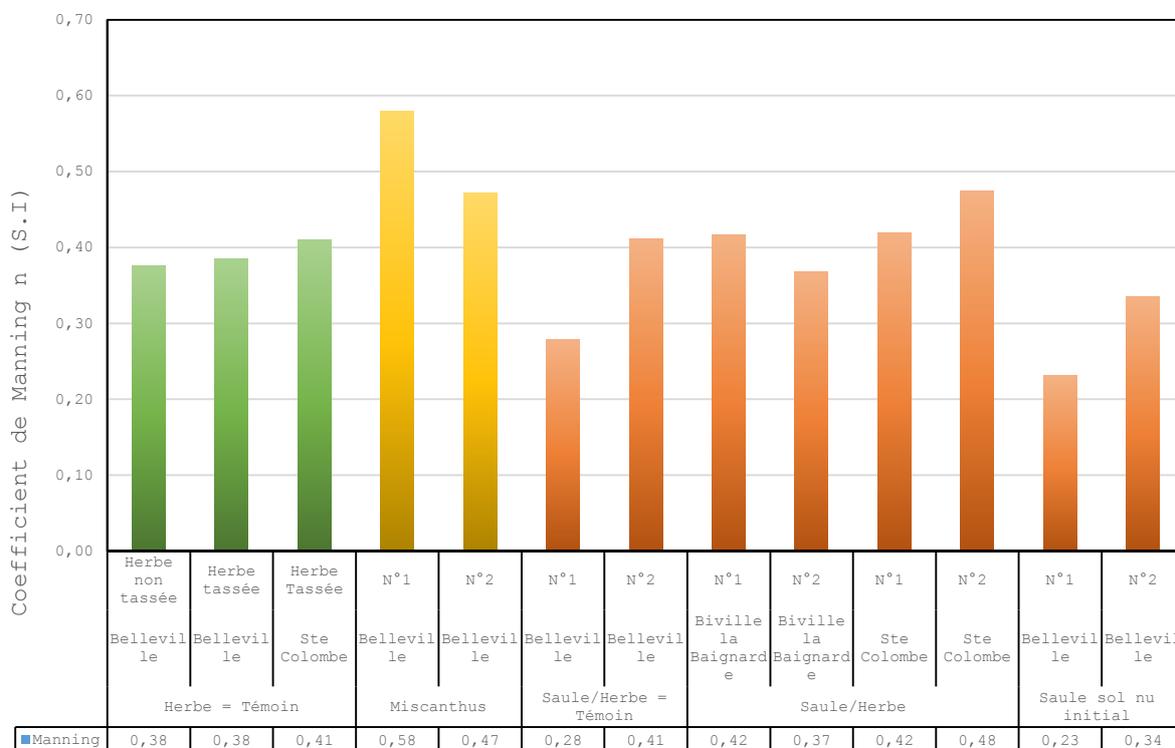


Figure 24 - Coefficient de Manning à 6 L/s/ml par modalité sur les 3 sites : Belleville-en-Caux, Biville la Baignarde et Sainte Colombe

Modalités	Sites	2017		
		Taux de Couvert Végétal vivant (%)	Manning en $m^{-1/3} \cdot s$ 2.0 L/s/ml < Q < 7 L/s/ml	
			Fourchette	Valeur à 6 L/s/ml
Herbe non tassée = Témoin	Belleville en Caux	100	0.52 - 0.36	0,38
Herbe tassée = Témoin	Belleville en Caux	100	0.59 – 0.38	0,38
Herbe tassée = Témoin	Ste Colombe	100	0.60 – 0.39	0,41
Miscanthus N°1	Belleville en Caux	40	0.77– 0.54	0,58
Miscanthus N°2	Belleville en Caux	32	0.71 – 0.45	0,47
Saule/Herbe non tassé N°1 = Témoin	Belleville en Caux	90	0.38 – 0.29	0,28
Saule/Herbe non tassé N°2 = Témoin	Belleville en Caux	90	0.65 – 0.37	0,41
Saule/Herbe N°1	Biville la Baignarde	90	0.51 – 0.35	0,42
Saule/Herbe N°2	Biville la Baignarde	90	0.58 – 0.34	0,37
Saule/Herbe N°1	Ste Colombe	90	0.58 – 0.38	0,42
Saule/Herbe N°2	Ste Colombe	90	0.79 – 0.42	0,48
Saule Sol Nu initial N°1	Belleville en Caux	35	0.29 – 0.23	0,23
Saule Sol Nu initial N°1	Belleville en Caux	50	0.43 – 0.32	0,34

Tableau 4 - Résultats des mesures de frein hydraulique sur les différentes modalités présentes à Belleville-en-Caux, Biville la Baignarde et Sainte Colombe

Ces résultats mettent en évidence les 3 familles de couverts classées par ordre décroissant de valeur moyenne du coefficient de Manning n.

- Le miscanthus**, à Belleville-en-Caux. La valeur moyenne du coefficient de Manning des deux placettes est de 0,53. Ce résultat est en cohérence avec les résultats précédents de l'AREAS sur ce type de couvert. Mais l'écartement des touffes qui a tendance à diminuer depuis les essais précédents, permet encore la présence d'écoulements préférentiels qui limite fortement la capacité de frein hydraulique. Lors de précédents essais à Étoutteville, Nous avons mesuré les conséquences d'un passage préférentiel de différentes largeurs au sein d'une touffe de miscanthus. Il est donc possible d'estimer le coefficient de Manning des miscanthus de Belleville en l'absence de passage préférentiel. Ceux-ci atteindraient un coefficient de Manning moyen de l'ordre de 0.70.

- **L'herbe haute et dense avec ou sans BLC** - Belleville-en-Caux et Sainte Colombe.

La valeur moyenne du coefficient de Manning est de l'ordre de 0,4. Ce résultat est en cohérence avec les références internationales qui donnent une valeur de 0,3. Pour **les Saules enherbés** présents sur les trois sites testés, les coefficients de Manning sont compris entre 0.3.7 et 0.48 dus à la présence d'herbe abondante, dense et haute.

- **Le Saule sol nu initial et le Saule/Herbe témoin n°1** - Belleville en Caux

Ce couvert possède un coefficient de Manning compris entre 0,23 et 0,34. Ces deux modalités ont soit un couvert d'herbe relativement faible de l'ordre de 35 % soit une herbe haute mais peu dense.



Figure 25 - Débit à 6 L/s/ml utilisé pour estimer la capacité de ralentissement dynamique sur le Saule/Herbe de Sainte Colombe

Pour comparer plus facilement les différentes modalités, les figures suivantes présentent les résultats de ralentissement dynamique exprimés en % des témoins herbe de chaque site pour un débit choisi à 6 L/s/ml.

On peut observer que le coefficient de Manning des miscanthus est 40 % plus élevé que celui de l'herbe ; que celui de saule sur herbe est naturellement équivalent à celui de l'herbe, mais que celui de Saule sol nu initial est en moyenne 25 % plus faible que celui de l'herbe.

4.2. Impact des bandes ligno-cellulosiques sur l'infiltration à saturation

Comme expliqué aux paragraphes 3.13 et 3.14, les mesures d'infiltration à saturation ont été réalisées avec les faibles débits, après une période de saturation des sols. L'ensemble des résultats détaillés est disponible en annexe pour chaque modalité.

Le graphique de la Figure 26 donne l'ensemble des résultats sur les 3 sites de mesures.

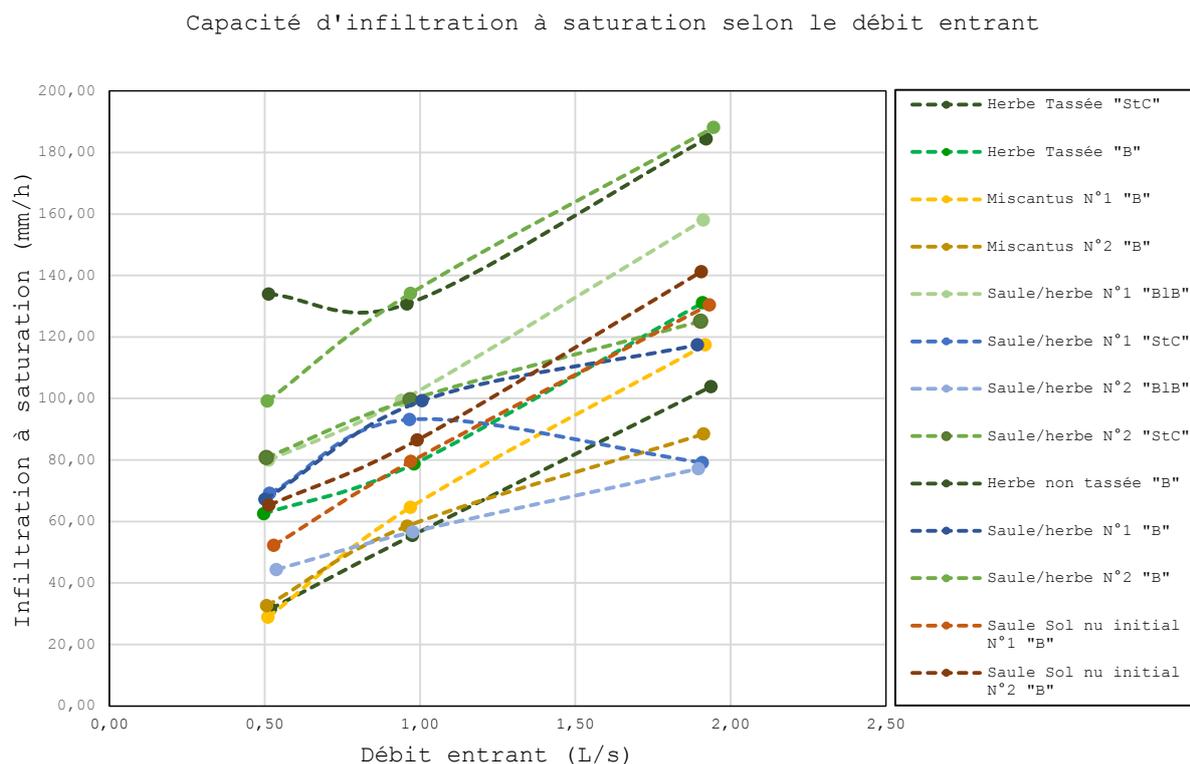


Figure 26 - Graphique présentant les résultats d'infiltration à saturation pour les 3 sites en fonction du débit spécifique Belleville-en-Caux, Biville la Baignarde et Sainte Colombe

Les résultats sont très influencés par le débit. Plus le débit croît, plus l'infiltrabilité croît. Ceci est normal, puisque la hauteur de charge liée à l'épaisseur de la lame d'eau augmente (loi de Darcy).

Pour ces raisons, il a été choisi de présenter les valeurs de l'infiltration à saturation pour un débit spécifique de 1L/s/m qui s'avèrent assez bien représentatives des modalités.

Le Tableau 5 récapitule les résultats présentés pour chaque modalité par leur plage de valeurs et la valeur à 1L/s/m.

Modalités	Sites	Taux de Couvert végétal vivant %	Infiltration (mm/h) à saturation pour 0.5 L/s/ml < Q < 2.0 L/s/ml		
			Fourchette	Moyenne	1.0 l/s/ml
Herbe = Témoin	Belleville en Caux	100	131 - 184	150	131
	Belleville en Caux	100	62 - 131	91	79
	Ste Colombe	100	31 - 103	63	55
Miscanthus	Belleville en Caux	55	29 - 117	70	65
	Belleville en Caux	45	32 - 88	60	59
Saule Sol Nu initial	Belleville en Caux	35	52 - 130	87	79
	Belleville en Caux	50	64 - 138	96	85
Saule + Herbe	Belleville en Caux	90	67 - 117	95	99
	Belleville en Caux	90	99 - 188	141	134
	Biville	90	80 - 158	112	99
	Biville	90	44 - 77	59	57
	Ste Colombe	90	69 - 93	80	93
	Ste Colombe	90	81 - 125	102	100

Tableau 5 - Résultats de la capacité d'infiltration à saturation sur les différentes modalités présentes à Belleville-en-Caux, Biville la Baignarde et Ste Colombe

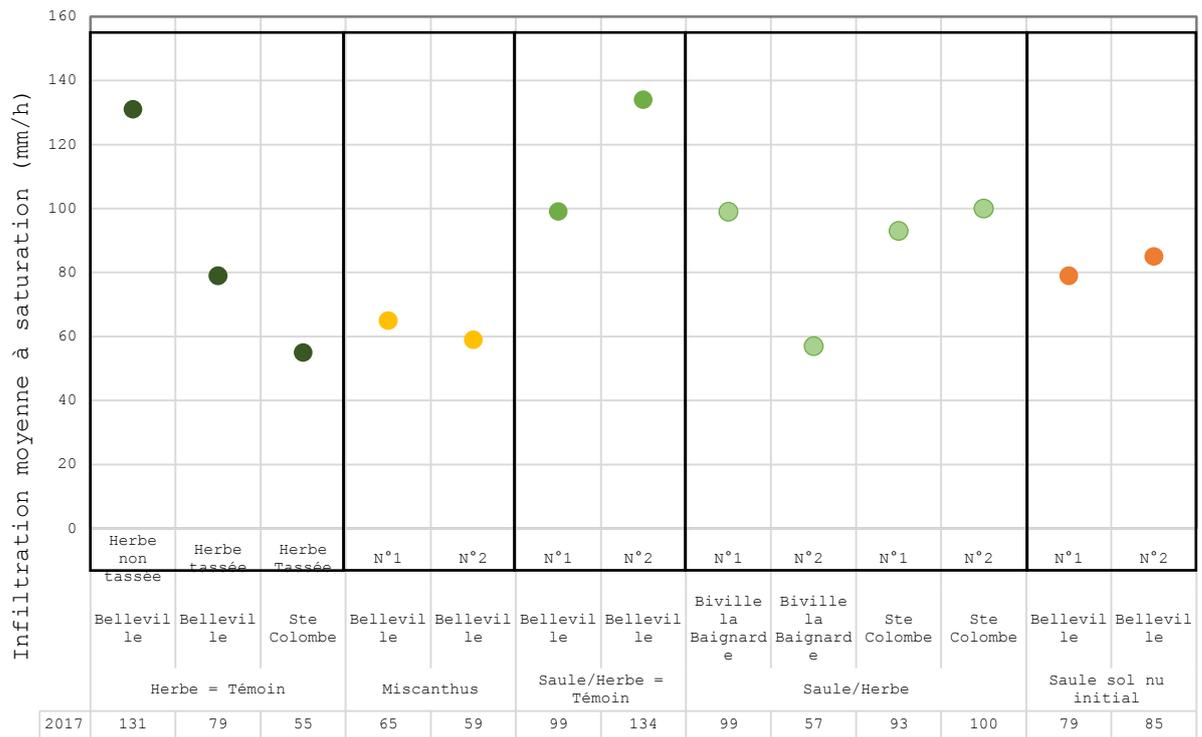


Figure 27 : Résultats par modalité

La Figure 27 illustre les résultats classés par modalité.

La Figure 28 présente la moyenne d'infiltrabilité des modalités.

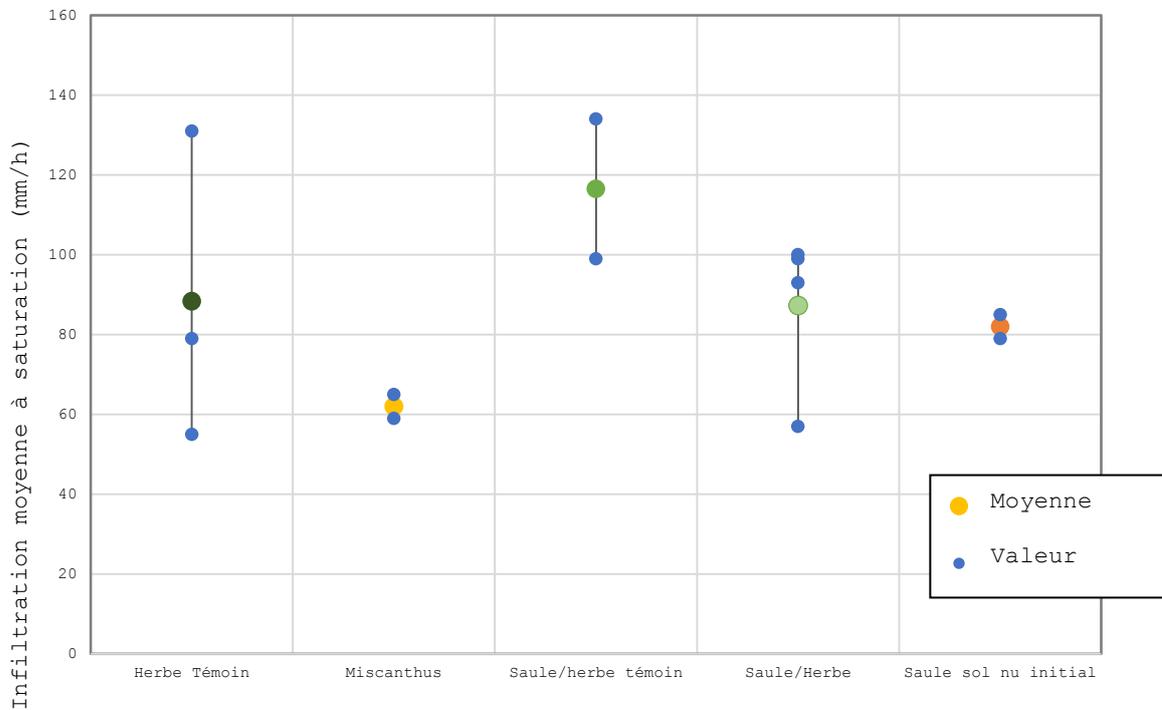


Figure 28 - Capacité d'infiltration à saturation moyenne en mm/h par type de BLC après 6 années de culture

Ces résultats mettent en évidence des différences selon les sites du fait de la nature des sols. Néanmoins, il en ressort 2 enseignements principaux :

- Après plusieurs années de mise en culture et de récolte, toutes les modalités possèdent une capacité d'infiltration à saturation élevée, comprises entre la valeur minimale de l'herbe : 60 mm/h et 100 mm/h. Seuls certains témoins non récoltés (sans tassements) atteignent des valeurs maximales d'environ 150 mm/h.
- Il existe une forte variabilité au sein de la modalité « Herbe » liée notamment aux tassements.

Ces résultats indiquent que trois groupes de modalités se distinguent selon les valeurs de l'infiltrabilité à saturation, classées par ordre décroissant :

- **Les modalités témoins à très forte infiltration** que sont : un TTCR de Saule enherbé de Belleville en Caux et le témoin herbe N° 1 à Belleville en Caux : l'infiltration à saturation sous ces modalités est la plus élevée : 130 mm/h. **Ces modalités subissent peu ou pas de tassements.** Le témoin herbe N° 1 à Belleville en Caux se situe à quelques mètres de « Saule/Herbe » et jouxte un petit tas de compost. Il semblerait donc qu'il ne soit pas soumis à des passages d'engins agricoles lors du ramassage des miscanthus ou lors des travaux agricoles sur les parcelles avoisinantes.
- **Les modalités à capacité d'infiltration élevée comprise entre 100 et 80 mm/h.** Il s'agit des modalités Saule/Herbe à Biville la Baignarde et à Sainte Colombe et de la modalité Saule sol nu initial de Belleville en Caux. Pour les « Saule/Herbe » de Biville la Baignarde et de Sainte Colombe,

La modalité N° 1 Saule/Herbe à Biville la Baignarde possède une capacité d'infiltration de 100 mm/h. Lors de l'essai une forte infiltration latérale a été notée sur la modalité N°1 malgré l'absence de fuite et un enfoncement suffisant des plaques du canal de mesures des flaques sont apparues tout autour du canal lors de l'essai. La capacité d'infiltration de la modalité calculée est donc surestimée par rapport à la réalité. Sur cette modalité deux passages de roues sont bien visibles sur le sol une à l'amont des saules et une à l'aval qui représentent environ 30 % de la surface d'infiltration.

Pour les « Saule sol nu initial » de Belleville en Caux : l'infiltration à saturation sous ce couvert est de 80 mm/h en moyenne sur limons peu épais. Cette bande ligno-cellulosique a été récoltée l'hiver précédant les essais. Les saules rabattus ont permis le développement temporaire d'un couvert herbacé entre les saules mais qui reste relativement faible et peu dense au regard des autres modalités Saule/Herbe.
- **Les modalités à capacité d'infiltration moyenne : Miscanthus, la modalité n° 2 Saule/Herbe à Biville la baignarde et le témoin Herbe N° 2 de Belleville en Caux et la modalité Herbe à Sainte Colombe.** Pour ces modalités les infiltrations à saturation moyenne sont de l'ordre de 60 mm/h.

Pour le Miscanthus, le sol de cette modalité comporte environ 10 cm d'Humus ce qui favorise la vie du sol en surface. Cependant sous cette couche d'humus le sol reste dur, compacté par les récoltes annuelles. Ce compactage explique en partie la capacité d'infiltration à saturation plus faible sur cette modalité.

Pour le témoin herbe N° 2 de Belleville en Caux, contrairement au précédent, il est situé en plein milieu de la zone enherbée, mais il possède une capacité d'infiltration nettement inférieure aux autres modalités de la zone de limons épais. On peut penser que sa situation au sein de la bande enherbée la soumet à des tassements répétés notamment lors de la récolte des miscanthus.

Pour la modalité N° 2 **Saule/Herbe à Biville la baignarde** la capacité d'infiltration atteint 55 mm/h, pour autant elle ne présentait pas de flaque en périphérie ni aucune fuite visible. Comme pour la modalité N° 1, deux passages de roues sont bien visibles sur le sol un à l'amont des saules et un à l'aval qui représentent environ 30 % de la surface d'infiltration.

- Pour le témoin **Herbe à Sainte Colombe**, la capacité d'infiltration à saturation est la plus faible de toutes les expériences. L'herbe de cette modalité est basse et peu dense le sol est en grande partie recouvert de mousse qui se développe au sein de l'herbe. La mousse est un indice d'un sol compacté, mal aéré et humide. Ses propriétés hydrophobes peuvent diminuer la capacité d'infiltration de la modalité.

Malgré des tassements réguliers et récents, la capacité d'infiltration à saturation des modalités en production (saules et miscanthus) est intéressante dans la lutte contre le ruissellement, et équivalente à celle de l'herbe exploitée.

4.3. Impact des bandes Ligno-cellulosiques sur la capacité à provoquer la sédimentation et réduire les transferts de MES :

L'évaluation de l'impact des différentes bandes Ligno-cellulosiques sur la capacité à favoriser la sédimentation des particules érodées et des éléments en suspension a été appréhendée par l'intermédiaire de la modélisation comme indiqué au chapitre 3.3.



Figure 29 - Passage de roues en aval de la modalité Saule/herbe de Biville la Baignarde

Afin de pouvoir comparer les différentes modalités testées, il a été nécessaire de travailler à pente constante et identique pour toutes ces modalités. Nous avons choisi une pente de 3.0 % qui représente la majorité des pentes en Pays de Caux. Un travail a donc été réalisé afin de ramener tous les résultats à une pente de 3 %

Ce changement de pente a obligé à recalculer les hauteurs d'écoulement pour tous les débits testés des 13 modalités. Ceci était possible puisque les valeurs du coefficient de Manning avaient déjà été déterminées. Ensuite, connaissant la hauteur d'eau et la pente, la longueur du plan d'eau a été calculée en prenant soin de soustraire la longueur correspondant à la hauteur de l'écoulement témoin (= Sol nu sous saule 2013). Puis le modèle de Dabney a été appliqué de la même façon à

tous les débits des 13 modalités avec 2 types de granulométrie (fine et grossière) issues d'un seul type de sol limoneux du Pays de Caux. Les résultats sont présentés dans le Tableau 6 et dans la Figure 32 et la Figure 33 en % de MES sédimentés par rapport aux concentrations injectées.

La modalité Saule sol nu 2013 peut être considérée comme un bon témoin du fait de l'absence de frein hydraulique du couvert sur des lames d'eau de faible épaisseur.

Les tableaux complets avec tous les résultats de cette modélisation sont placés en annexe.

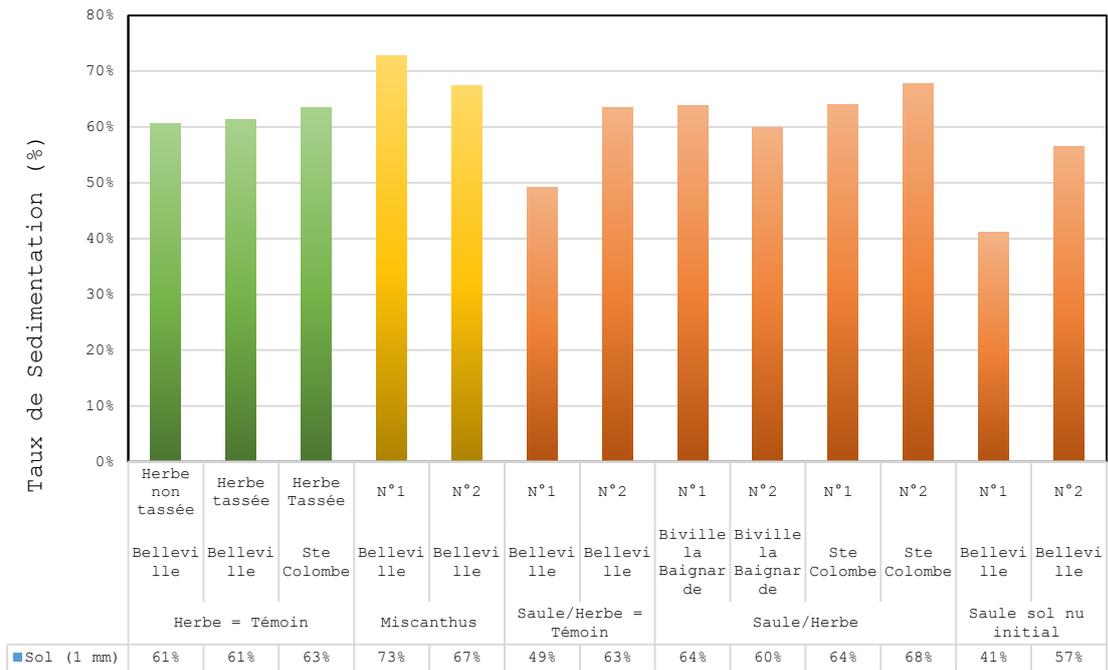


Figure 30 - Taux de sédimentation du sol tamisé à 1 mm à 6 L/s/ml sur une pente de 3 % pour les différents objets testés

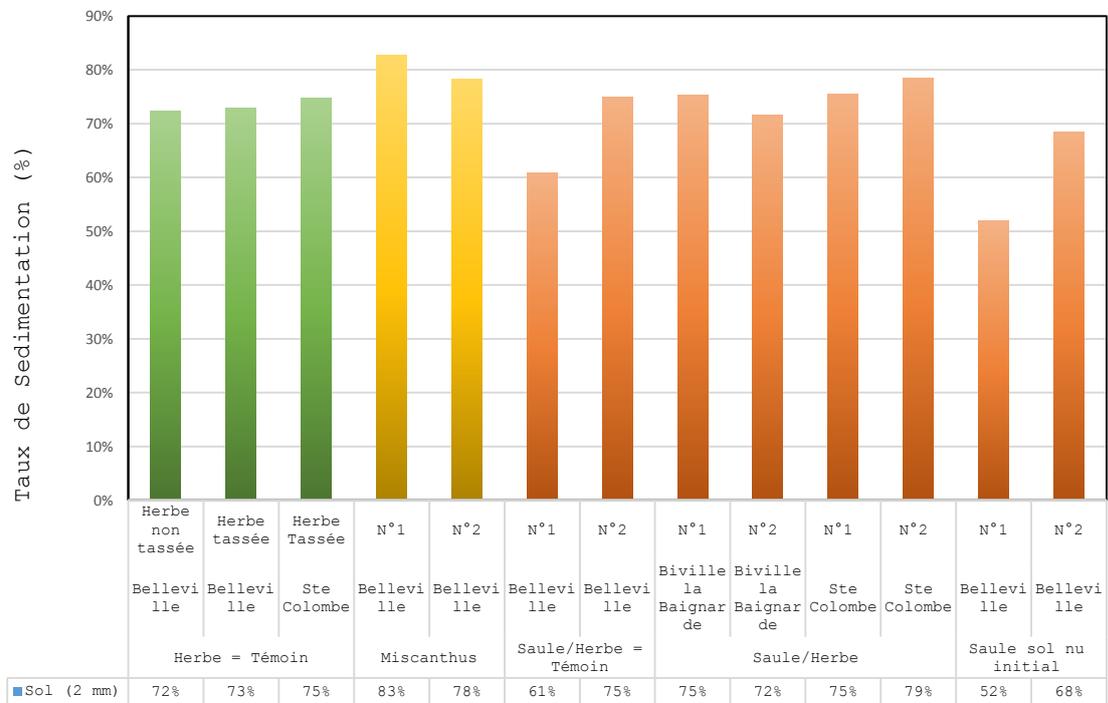


Figure 31 - Taux de sédimentation du Sol tamisé à 2 mm à 6 L/s/ml sur une pente de 3 % pour les différents objets testés

Modalité	Site	Taux de Couvert Végétal	Taux de sédimentation (%)	
			Q = 6.0 L/s/ml	
		%	Sol 1 tamisé à 1 mm	Sol 1 tamisé à 2 mm
Herbe 1 = témoin	Belleville	100	61%	72%
Herbe2 = témoin	Belleville	100	61%	73%
Herbe 1 = témoin	Ste Colombe	100	63%	75%
Miscanthus 1 ⁴	Belleville	55	78%	87%
Miscanthus 2 ⁵	Belleville	45	67%	78%
Saule/Herbe 1 = témoin	Belleville	90	49%	61%
Saule/Herbe 2 = témoin	Belleville	90	63%	75%
Saule/Herbe 1	Ste Colombe	90	64%	75%
Saule/Herbe 2	Ste Colombe	90	68%	79%
Saule/Herbe 1	Biville la Baignarde	90	64%	75%
Saule/Herbe 2	Biville la Baignarde	90	60%	72%
Saule sol nu initial 1	Belleville	35	41%	52%
Saule sol nu initial 2	Belleville	50	57%	68%

Tableau 6 - Taux de sédimentation pour le sol tamisé à 1 mm et à 2 mm pour un débit de 6 L/s/ml

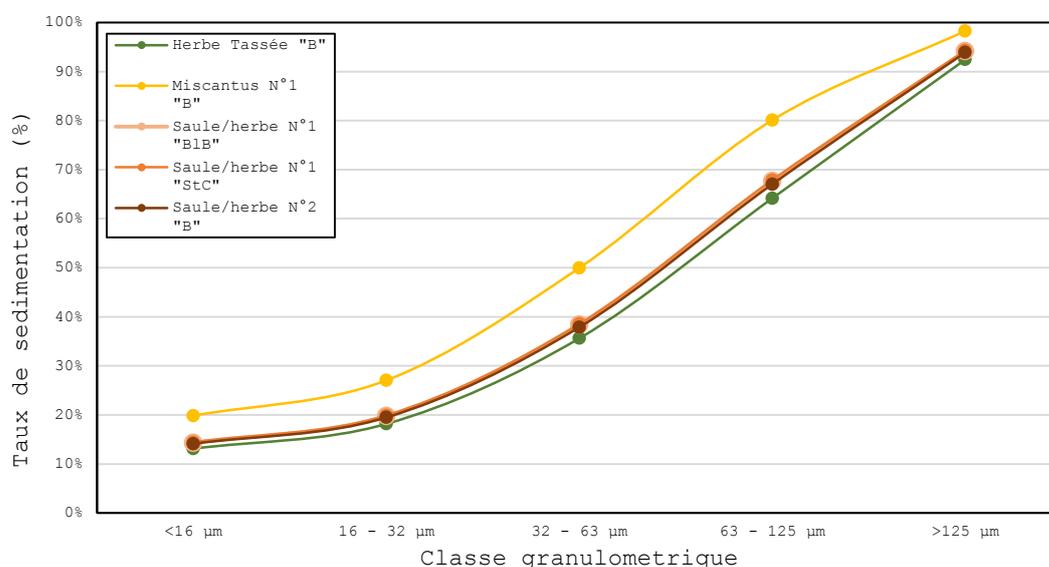


Figure 32 - Taux de sédimentation théorique des sédiments pour 5 des modalités testées en fonction de la classe granulométrique pour le sol tamisé à 1 mm à 6 L/s/ml

- 4) Les taux ont été estimés juste en aval d'une touffe dense qui faisait la totalité de la largeur du chenal (1 m), mais qui ne couvrait pas toute la longueur
- 5) Les taux ont été estimés juste en aval d'une touffe dense mais qui ne faisait pas la totalité de la largeur du chenal (1 m), et qui ne couvrait pas toute la longueur

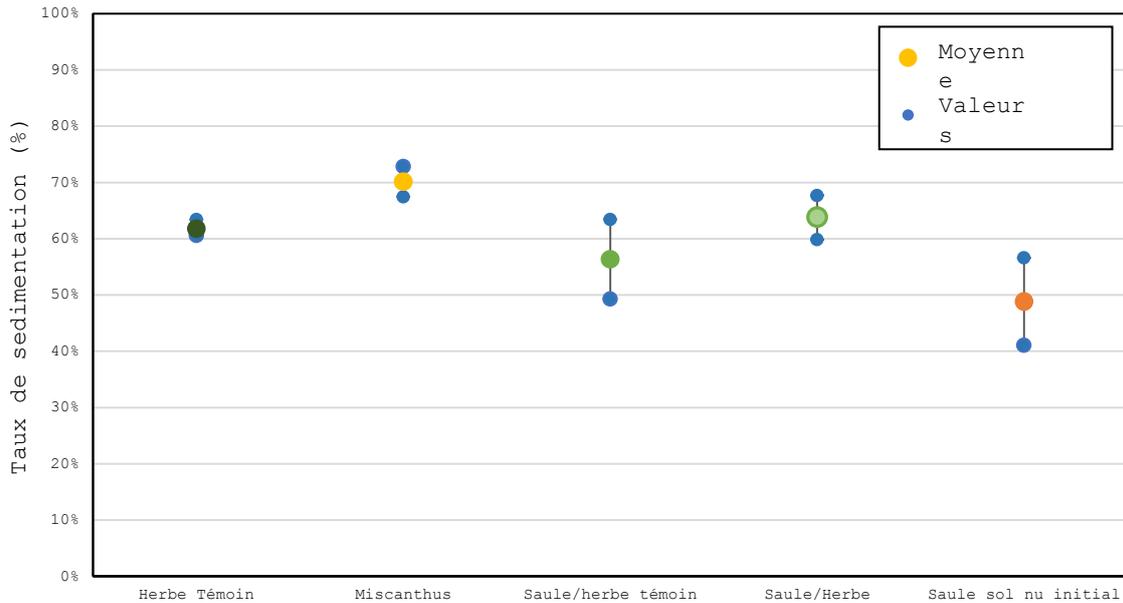
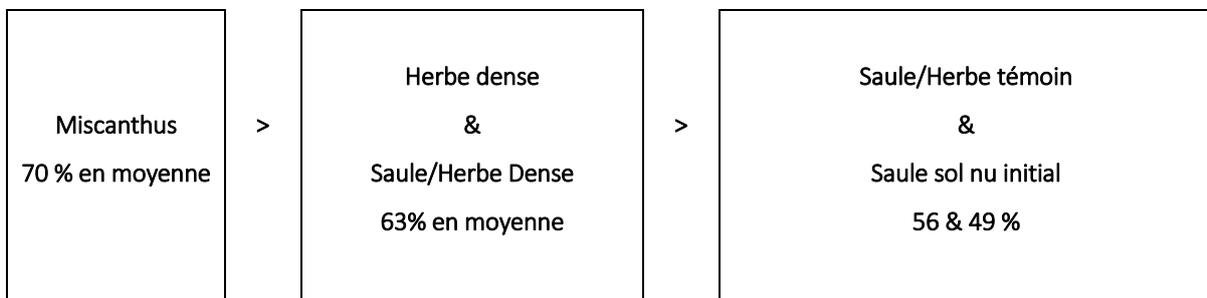


Figure 33 - Taux de sédimentation à 6 L/s/ml des différents objets pour le sol tamisé à 1 mm

Les résultats sont tous dépendants du débit : plus le débit croît, plus le taux de sédimentation décroît.

Pour le sol tamisé à 1 mm avec un débit spécifique de 6.0 L/s/ml comme le récapitule le tableau précédent, les taux de sédimentation varient entre 40 % et 80 %.

En accord avec les valeurs de ralentissement dynamique, le Miscanthus offre la meilleure efficacité pour ce débit spécifique donné. Cependant les valeurs restent minimisées du fait de la présence de passages préférentiels entre les touffes de miscanthus. L'Herbe dense possède une efficacité légèrement plus faible tout comme les saules dont l'enherbement au pied est dense. Les saules de Belleville en Caux dont la couverture au sol n'était que partielle possèdent les taux de sédimentation les plus bas. Pour ce débit spécifique, on peut classer les modalités par ordre d'efficacité décroissante comme suit, (en illustrant avec les valeurs moyennes du taux de sédimentation avec le sol tamisé à 1 mm et pour un débit spécifique de 6 l/s/ml) :



Vis-à-vis de la capacité à provoquer la sédimentation, c'est le miscanthus qui présente une efficacité supérieure à celle de l'herbe dense et suffisamment haute. La capacité à provoquer la sédimentation des saules dépend de la qualité de l'enherbement. Les saules dépourvus d'enherbement au pied ou possédant un couvert peu dense sont peu intéressants dans le cas de la sédimentation.

Par ailleurs, il ne faut pas oublier que les BLC doivent conserver une bonne efficacité pendant la saison hivernale, période où se produit le plus grand nombre d'épisodes de ruissellements en Haute-Normandie. Cet aspect donne un avantage certain au Miscanthus qui dispose de tiges lignifiées et résistantes à cette saison.

5. MISE EN REGARD AVEC LES RESULTATS DE 2013 sur le site de Belleville en Caux

Sur ce site, des mesures identiques ont été effectuées en 2013. Quatre années après, les plantes se sont développées, tant les parties aériennes utiles au frein dynamique et à la sédimentation, que les parties racinaires utiles à l'infiltration, mais dépendantes aussi des tassements liés aux récoltes successives.

Dans ce chapitre, on fait un examen comparé des résultats pour évaluer l'évolution des paramètres essentiels vis-à-vis de la réduction du ruissellement et de la sédimentation.

5.1. Évolution du ralentissement dynamique par frottement : Coefficient de Manning entre 2013 et 2017

Le Tableau 7, page suivante, et le Figure 34 ci-dessous présentent l'évolution du ralentissement dynamique entre 2013 et 2017 sur les modalités testées.

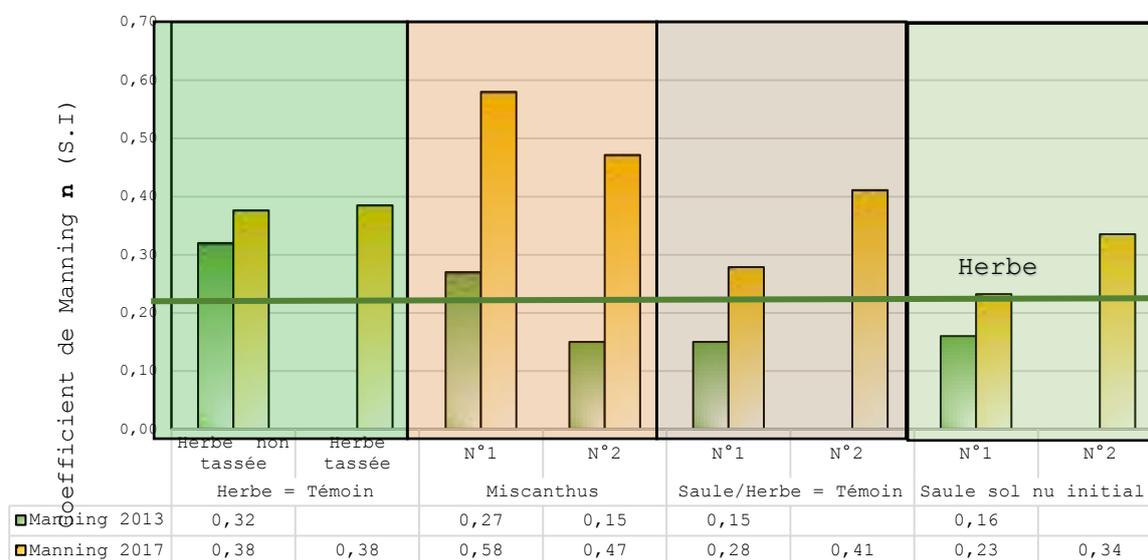


Figure 34 - Évolution des coefficients de Manning à 6 L/s/ml des différents objets entre 2014 et 2017



Figure 35 - Placette de miscanthus lors des essais de 2013 et 2017

Modalités	2013			2017		
	Taux de Couvert Végétal (%)	Manning en $m^{-1/3}.s$		Taux de Couvert Végétal (%)	Manning en $m^{-1/3}.s$	
		Fourchette	Valeur à 6 L/s/ml		Fourchette	Valeur à 6 L/s/ml
<u>Herbe = Témoin</u>	<u>100</u>	<u>0.25 – 0.35</u>	<u>0.32</u>	100	0.52 - 0.36	0.38
<u>Herbe = Témoin</u>				100	0.59 – 0.38	0.38
Misc. Dense	28 ⁽¹⁾	0.20 – 0.30	0.27	55	1.00 – 0.54	0.58
Misc. Peu Dense	17 ⁽²⁾	0.10 – 0.20	0.15	45	0.93 – 0.45	0.47
Saule/Herbe	85	0.10 – 0.20	0.15	90	0.30 – 0.24	0.28
Saule/Herbe				90	0.48 – 0.30	0.41
Saule sol nu initial	< 10	0.10 – 0.11	0.16	35	0.30 – 0.24	0.23
Saule sol nu initial				50	0.43 – 0.34	0.34

Tableau 7 - Tableau comparatif de la capacité de ralentissement des différentes modalités entre 2013 et 2017

Ces résultats nous montrent une hausse du ralentissement dynamique pour l'ensemble des objets testés.

- Les résultats de 2017 pour **l'herbe à Belleville en Caux** valident les précédents résultats et confortent le coefficient de Manning avec une légère hausse.
- Le **miscanthus** possède l'évolution à la hausse la plus significative puisque le coefficient de Manning est multiplié par trois sur les deux placettes. Le développement des touffes et l'augmentation du taux de couverture qui en découle créent un véritable obstacle à l'écoulement. Si le développement des miscanthus se poursuit l'ensemble des passages préférentielles encore présents devrait disparaître et augmenter significativement le frein hydraulique de l'objet.
- **Les témoins Saule/Herbe de Belleville en Caux** ont eux aussi augmenté leur capacité de ralentissement dynamique. Le développement de l'herbe au sein des saules entre 2013 et 2017 a permis de doubler le coefficient de Manning de ces objets.
- Les récoltes des « **Saule sol nu initial** » de **Belleville en Caux** ont permis le développement d'un couvert herbacé qui est majoritairement responsable de l'augmentation du coefficient de Manning de ces objets.

5.2. Évolution de l'infiltration à saturation entre 2013 et 2017

Le Tableau 8 page suivante, la Figure 36 et la Figure 37 ci-dessous présentent l'évolution de l'infiltration à saturation entre 2013 et 2017 sur les différents objets testés.

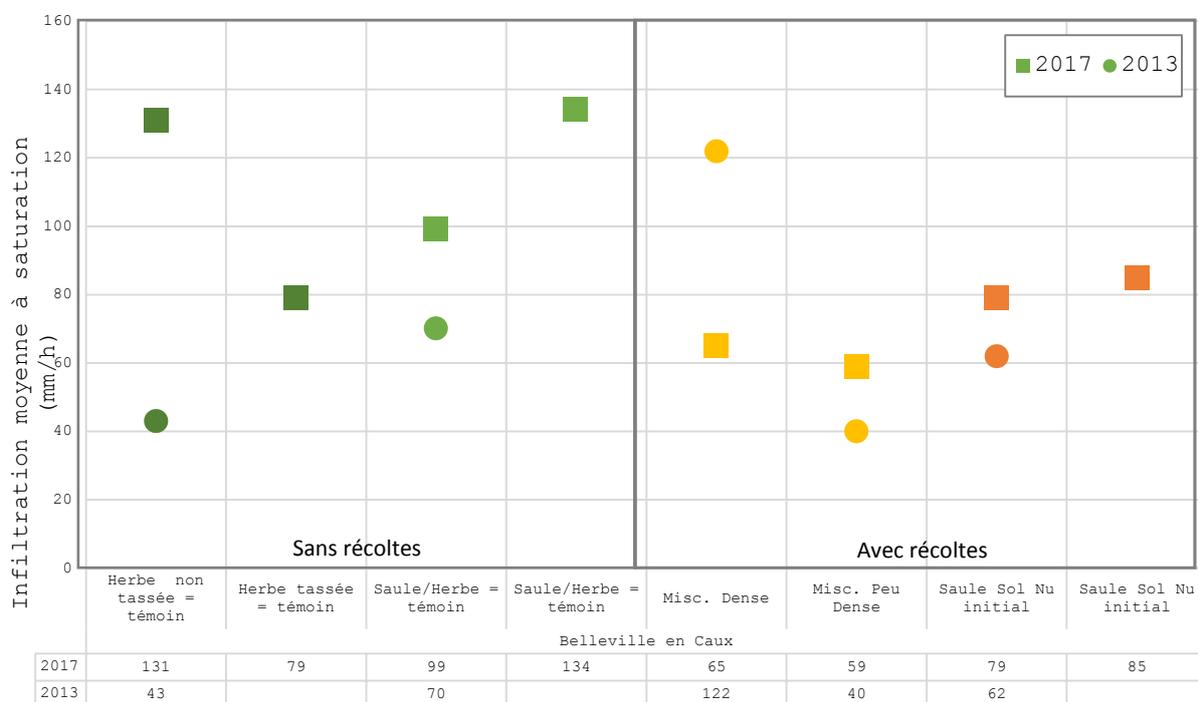


Figure 36 - Capacité d'infiltration à saturation des différentes placettes testées en 2013 et en 2017 pour un débit de 1 L/s

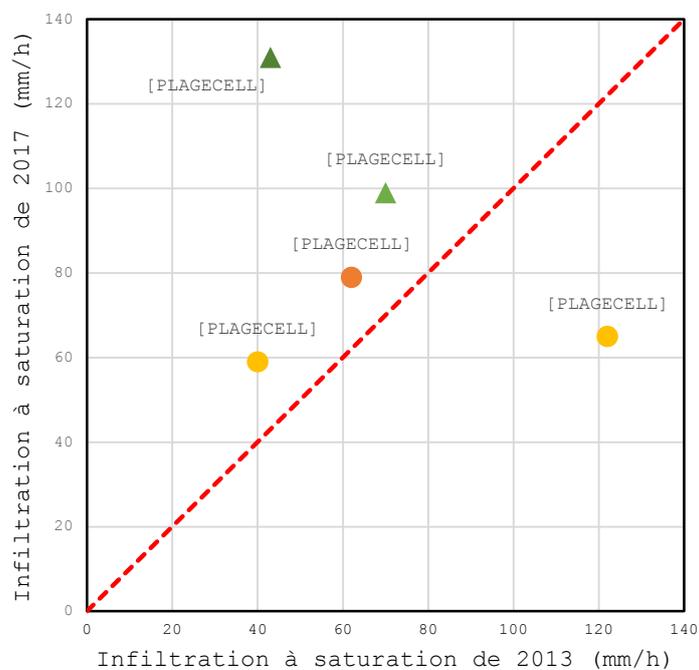


Figure 37 - Évolution de l'infiltration à saturation pour un débit de 1 L/s/ml entre 2013 et 2017 des modalités testées

Modalités	2013					2017			
	Saturation du Sol alentour	Taux de Couvert végétal %	Infiltration (mm/h) à saturation pour Q < 2.0 L/s/ml			Taux de Couvert végétal %	Infiltration (mm/h) à saturation pour Q < 2.0 L/s/ml		
			Fourchette	Moyenne	1.0 l/s/ml		Fourchette	Moyenne	1.0 l/s/ml
Herbe Non tassée N°1 = Témoin	Saturé	100	20 - 80	46	43	100	131 - 184	150	131
Herbe tassée N°2 = Témoin						100	62 - 131	91	79
Misc. Dense	Non Saturé	28	50 - 120	90	122	70	29 - 117	70	65
Misc. Peu Dense	Non Saturé	17	35 - 45	41	40	60	32 - 88	60	59
Saule/Herbe N°1 = Témoin	Non Saturé	85	40 - 100	70	70	100	67 - 117	95	99
Saule/Herbe N°2 = Témoin						100	99 - 188	141	134
Saule Sol Nu initial N°1	Non Saturé	<10	35 - 95	55	62	15	52 - 130	87	79
Saule Sol Nu initial N°2						40	64 - 138	96	85

Tableau 8 - Tableau comparatif des résultats d'infiltration des différentes modalités entre 2013 et 2017

Ces résultats nous montrent une hausse de la capacité d'infiltration à saturation pour les objets testés.

- **Le témoin Herbe non tassée à Belleville en Caux** enregistre la hausse la plus élevée, Le développement de l'herbe et l'absence de tassement ont permis au sol de retrouver une capacité d'infiltration intéressante du point de vue hydrologique.
- **Le témoin Saule/Herbe non tassé de Belleville en Caux** a lui aussi augmenté sa capacité d'infiltration à saturation. Le développement des saules ainsi que l'absence de récoltes et donc de tassement a permis à cette modalité de passer de 70 mm/h à 100 mm/h.
- **Les « Saule sol nu initial » de Belleville en Caux** voient leur capacité d'infiltration augmenter dans une moindre mesure. La récolte des « **Saule sol nu initial** » de **Belleville en Caux** précédant les essais a permis le développement d'un couvert herbacé au sol favorisant la capacité d'infiltration.
- La capacité d'infiltration du **miscanthus récolté** est plus variable. Elle augmente pour un essai, mais relativement peu si on la rapporte au développement du miscanthus pendant la période (de 18 % à 50 % de couverture végétale). Sur cette période, elle diminue pour le Miscanthus dense. Mais les récoltes annuelles dans des conditions de sol hivernal ont pu provoquer des tassements faisant passer sa capacité d'infiltration de 120 mm/h à 60 mm/h. Les deux miscanthus possèdent aujourd'hui la même couverture végétale et la même capacité d'infiltration à saturation.

5.3. Évolution de la capacité à provoquer la sédimentation entre 2013 et 2017 :

Conformément aux résultats précédents, le Figure 38 ci-dessous montre une hausse de la capacité à provoquer la sédimentation pour les modalités testées avec le sol tamisé à 1 mm et pour un débit unitaire de 6 l/s/ml.

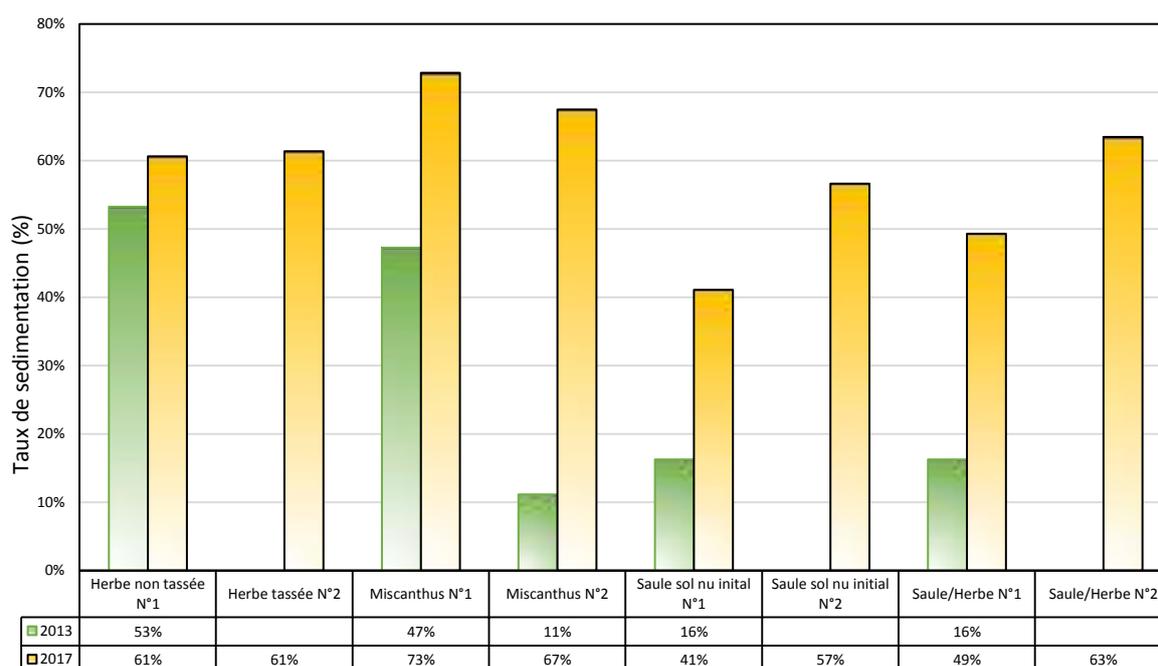


Figure 38- Évolution des taux de sédimentation à 6 L/s/ml des différentes modalités entre 2013 et 2017

- Le taux de sédimentation dans le couvert herbacé est cohérent et n'évolue pas de façon significative sur la période. Il croît de **50 à 60 %** ce qui correspond aux valeurs de la bibliographie.
- Le **Miscanthus** connaît une très forte hausse due à la croissance des touffes sur la période. **Son taux de sédimentation dépasse celui de l'herbe de 10 à 20 %.**
- Pour les modalités « **Saule sol nu initial** » et « **Saule/herbe** », leur capacité à favoriser la sédimentation a fortement augmentée, grâce au développement de l'herbe au pied des saules. Cela permet d'approcher les taux de sédimentation de la modalité herbe qui sert de témoin.



5 – RESULTATS ET ENSEIGNEMENTS

Pour chacun des 3 paramètres examinés : **ralentissement dynamique**, **capacité d'infiltration à saturation** et **capacité à sédimenter**, Figure 39, Figure 40 et Figure 41 ci-après, donnent une vue d'ensemble des résultats en prenant pour base le témoin « herbe » de chaque site, afin de tenir compte des différents types de sol entre les sites.

Remarques préliminaires :

1. Les conclusions présentées dans ce rapport ne sont valables que pour l'interception de ruissellements diffus ou peu concentrés dont les débits spécifiques restent inférieurs à 12 l/s/ml. Au-delà, les résultats peuvent fortement différer parce que les végétaux sont susceptibles de se coucher sous l'effet de la lame d'eau.
2. Les compactages lors des récoltes et la nature du sous-sol jouent un rôle prédominant dans la capacité d'infiltration à saturation.

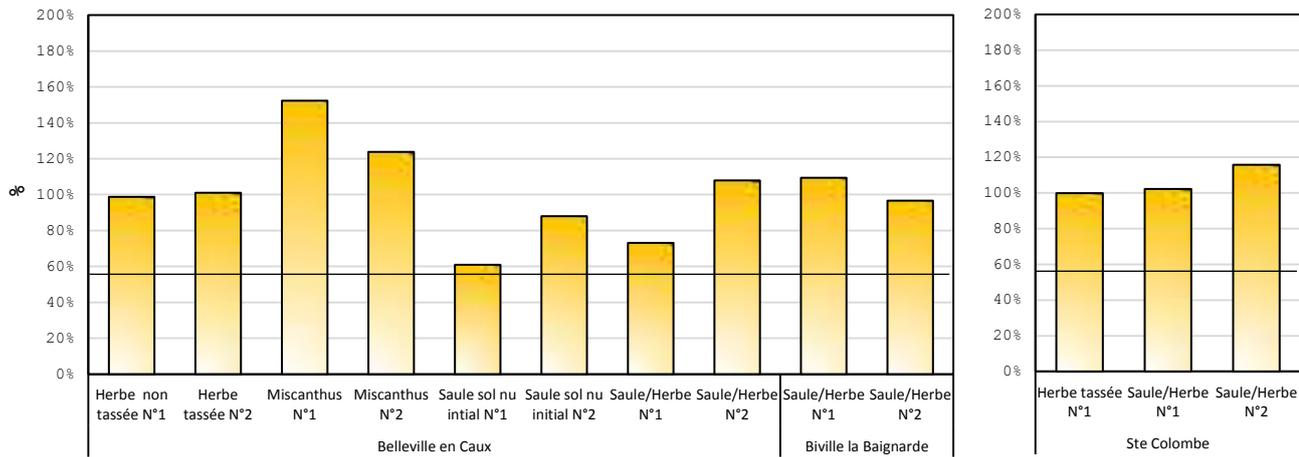


Figure 39 - Ralentissement dynamique des écoulements à 6 L/s/ml des différents objets exprimé en % des témoins herbe indépendamment à Belleville en Caux/Biville la Baignarde et Sainte Colombe

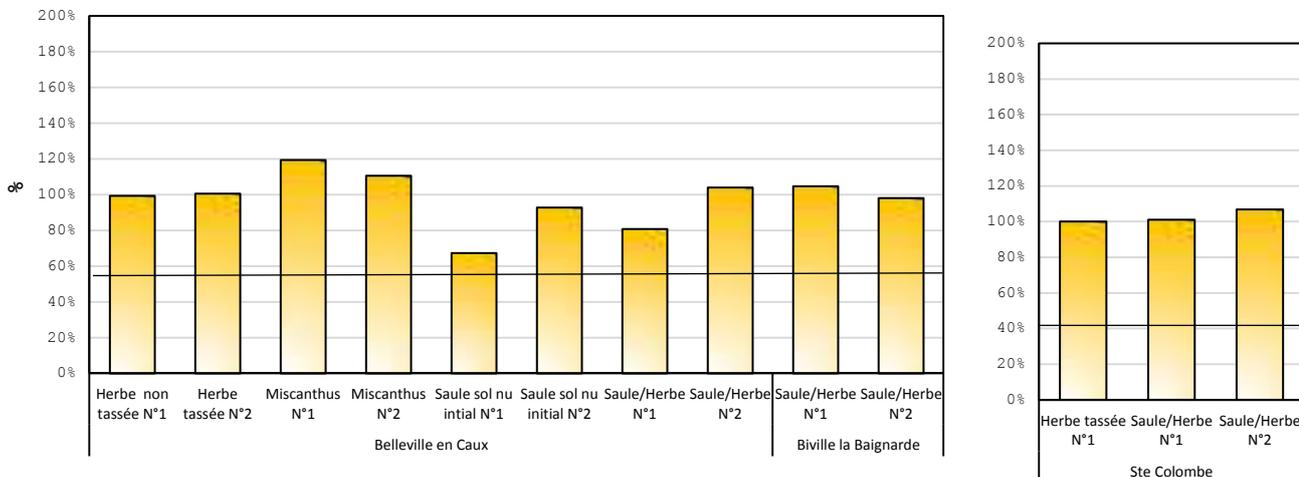


Figure 40 - Taux de sédimentation à 6 L/s/ml des différents objets exprimé en % des témoins Indépendamment à Belleville en Caux/Biville la Baignarde et Ste Colombe

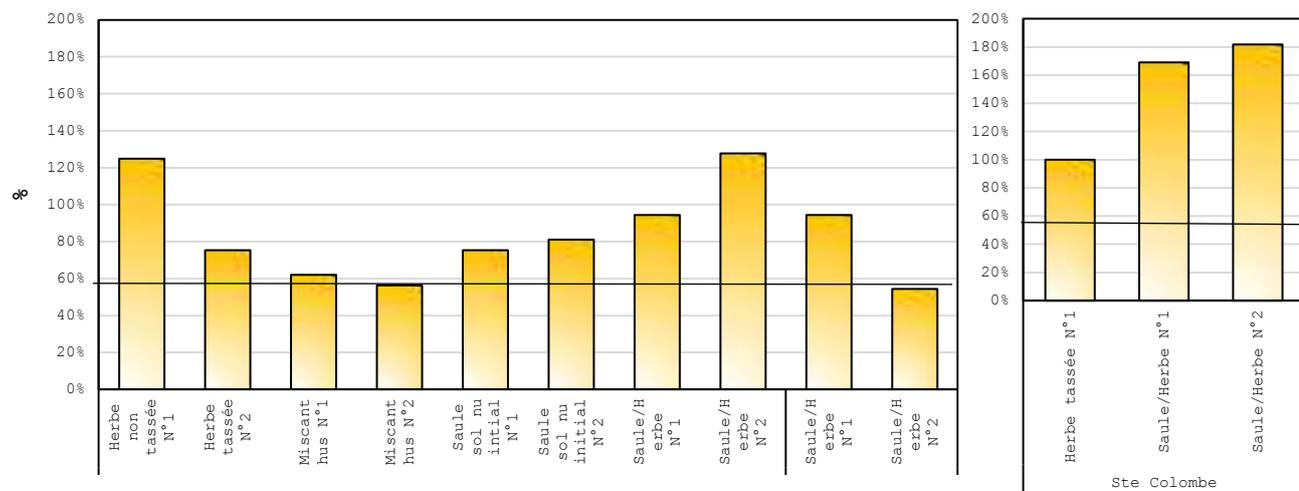


Figure 41 - Infiltration à saturation à 1 L/s/ml des différents objets exprimée en % des témoins herbe Indépendamment à Belleville en Caux/Biville la Baignarde et Sainte Colombe

Le tableau de synthèse récapitulatif de l'ensemble des résultats :

Modalité	Lieu (1)	Frein hydraulique	Infiltration à saturation	Sédimentation
Herbe (= témoin)	B/StC	<ul style="list-style-type: none"> L'ensemble des résultats pour cette modalité témoin est globalement conforme à la bibliographie. De par sa forte densité en brins d'herbe, l'herbe quand elle est haute et dense présente une capacité élevée de frein hydraulique et de ce fait, l'une des 2 meilleures capacités à favoriser la sédimentation. L'herbe, en condition normale d'utilisation avec des passages répétés et des tassements, n'est pas la meilleure modalité pour l'infiltration à saturation (≈ 65 mm/h pour $Q=1/l/s/ml$), même si les mesures ont été assez variables. 		
Miscanthus	B	<ul style="list-style-type: none"> Après 6 années d'exploitation, ce couvert donne des résultats de frein hydraulique et de sédimentation élevés et nettement supérieurs à ceux obtenus avec de l'herbe lorsque sa densité est forte. Le Miscanthus s'avère aussi efficace que l'herbe dès la troisième année après la plantation. Il est le seul couvert à atteindre la capacité de sédimentation d'une fascine et reste efficace même en hiver. Par contre, pour l'infiltration, les valeurs mesurées sont plus faibles que les autres modalités (≈ 60 mm/h pour $Q=1/l/s/ml$). Les récoltes annuelles pendant la saison hivernale induisent des tassements répétés qui diminuent notablement sa capacité d'infiltration. 		
Saule sur herbe (hors témoin)	B/StC/ BIB	<ul style="list-style-type: none"> Les valeurs de capacités de frein hydraulique et de sédimentation sont très proches des valeurs observées sur l'herbe, car c'est la présence de l'herbe sous les saules qui donne l'essentiel des résultats de ces modalités. Les saules n'ont que peu d'influence. L'infiltration à saturation est élevée tout en étant variable (≈ 90 mm/h pour $Q=1/l/s/ml$) et meilleure que sous couvert herbacé seul. 		
Saule sol nu initial	B	<ul style="list-style-type: none"> Les premières années, en l'absence d'herbe, cette modalité n'offre aucun frein hydraulique (cf. résultat 2013), ce qui ne permet pas de provoquer la sédimentation. Lors des essais de 2017, on constate que les récoltes successives des saules ont permis le développement d'herbe peu dense au sol. La capacité de frein hydraulique et de sédimentation croît avec le temps grâce à la présence d'un léger couvert herbacé, mais reste inférieure aux Saules sur herbe et témoin herbe. Avec le temps, l'infiltration à saturation (≈ 82 mm/h pour $Q=1/l/s/ml$) devient supérieure ou égale à celle de l'herbe. 		
Saule sur herbe (témoin non récolté)	B	<ul style="list-style-type: none"> Comme pour les saules sur herbe récoltés, les valeurs de capacités de frein hydraulique et de sédimentation sont très proches des valeurs observées sur l'herbe. L'infiltration à saturation est très élevée (≈ 115 mm/h pour $Q=1/l/s/ml$) grâce à l'absence de tassement dû aux récoltes. 		

(1) : B = Belleville-en-Caux ; StC = Ste Colombe ; BIB = Biville la Baignarde

Pour conclure

Les résultats de ces expérimentations 2017 valident et confirment les résultats de 2013 et permettent de tirer des conclusions sur l'évolution de ces modalités après 4 ans d'exploitation des cultures.

Au regard des critères de frein hydraulique, des capacités à provoquer la sédimentation, **avec le temps le Miscanthus devient la modalité la plus efficace**. Lors des premières années ses capacités sont à peine équivalentes à celles d'une bande enherbée puis lors de son développement et de sa densification elles dépassent largement l'herbe pour atteindre les capacités d'une fascine. D'après les observations sur l'âge et les dimensions de plusieurs touffes sur des parcelles différentes, une densité de l'ordre de 3 pieds/m² devrait permettre d'atteindre cet objectif dans un délai assez court, de l'ordre de 5 à 7 ans sur sol agricole fertile.

Pour toutes les modalités, les tassements répétés, provoqués par les récoltes successives, diminuent la capacité d'infiltration à saturation, mais elle reste équivalente à celle de l'herbe. Ces types de BLC sont donc intéressants dans la lutte contre le ruissellement.

Les BLC à base de saules qui ont un couvert herbacé dense au pied, présentent des capacités d'infiltration à saturation améliorées au bout de 6 années par rapport à l'herbe, même en situation de parcelle récoltée. Avec un faible couvert, les résultats sont du même ordre que ceux obtenus avec de l'herbe tassée. Du point de vue des caractéristiques de frein hydraulique et de sédimentation, les résultats dépendent directement du couvert herbacé et de sa densité. Les saules avec implantation d'un couvert herbacé les mois qui suivent la plantation, obtiennent les mêmes résultats qu'un pur couvert herbacé. Les saules sans implantation d'herbe, voient un petit couvert se développer au fil des ans, mais les résultats sont inférieurs à ceux d'un couvert herbacé ou d'une bande enherbée.

BILAN sur l'efficacité des modalités après 6 ans d'exploitation.		Fonctions	
		Sédimentation (Q =6 l/s/ml)	Infiltration (Q =1 l/s/ml)
Miscanthus récolté		+++	++
Saules récoltés	Sol nu initial	+ à ++	++
	Couvert Herbacé	++	+++
Témoin Herbe avec passages de matériel		++	++
Témoin Herbe non tassée		++	+++
Fascine (pour mémoire)		+++	0 à +

Liste des Figures

Figure 1- Localisation des sites de Belleville-en-Caux et Mauquenchy	2
Figure 2 - Site de Belleville-en-Caux	3
Figure 3 - Miscanthus - Belleville en Caux.....	3
Figure 4 - Localisation des différentes placettes - Belleville-en-Caux	4
Figure 5 - Saule sol nu initial - Belleville en Caux.....	4
Figure 6 - Saule/Herbe témoin - Belleville en Caux	4
Figure 7 - Site de Biville la Baignarde	5
Figure 8 - Localisation des différentes placettes - Biville la Baignarde.....	5
Figure 9 - Saule/Herbe - Biville la Baignarde.....	6
Figure 10 - Site de Sainte Colombe	7
Figure 11 - Localisation des différentes placettes - Sainte Colombe.....	7
Figure 12 - Saule/Herbe - Sainte Colombe.....	8
Figure 13 - Le canal de mesures, vue des entretoises.....	10
Figure 14 - Lecture d'une hauteur d'eau.....	10
Figure 15 - Topographie de la placette de Neuville-Ferrières, points topographiques relevés et interpolation de la surface du sol	10
Figure 16 - Représentation du sol et des lignes d'eau en deux dimensions sur le miscanthus - Belleville en Caux.....	11
Figure 17 - Schéma des pièces du simulateur de ruissellement permettant la circulation de l'eau	12
Figure 18 - Dispositif complet du simulateur de ruissellement (Saint-Gilles-de-la-Neuville, 2011)	13
Figure 19 - Fourchette d'incertitude sur les valeurs de débit infiltré en fonction du débit entrant	14
Figure 20 - Prédiction de taux de sédimentation pour un débit de $0,33 \text{ m}^3/\text{minute}/\text{m} = 5,5 \text{ L/s}/\text{m}$ selon les équations de FLANAGAN <i>et al.</i> (1989) devant une haie herbacée, en fonction de la longueur de sédimentation, d'après DABNEY <i>et al.</i> (1995).....	17
Figure 21 - Granulométrie détaillée du matériau source issu du sol N° 1 tamisé à 1 mm (T1) et tamisé entre 1 et 2 mm (T21).	19
Figure 22- Coefficient de Manning des différentes modalités testées en fonction du débit spécifique.	20
Figure 23 - Illustration d'un débit inférieur à 2 L/s/ml dans la modalité Saule/Herbe à Biville la Baignarde.....	21
Figure 24 - Coefficient de Manning à 6 L/s/ml par modalité sur les 3 sites :.....	21
Figure 25 - Débit à 6 L/s/ml utilisé pour estimer la capacité de ralentissement dynamique sur le Saule/Herbe de Sainte Colombe.....	23
Figure 26 - Graphique présentant les résultats d'infiltration à saturation pour les 3 sites en fonction du débit spécifique.....	24
Figure 27 : Résultats par modalité.....	26
Figure 28 - Capacité d'infiltration à saturation moyenne en mm/h par type de BLC après 6 années de culture.....	26
Figure 29 - Passage de roues en aval de la modalité Saule/herbe de Biville la Baignarde.....	28
Figure 30 - Taux de sédimentation du sol tamisé à 1 mm à 6 L/s/ml sur une pente de 3 % pour les différents objets testés ...	30
Figure 31 - Taux de sédimentation du Sol tamisé à 2 mm à 6 L/s/ml sur une pente de 3 % pour les différents objets testés ...	30
Figure 32 - Taux de sédimentation théorique des sédiments pour 5 des modalités testées en fonction de la classe granulométrique pour le sol tamisé à 1 mm à 6 L/s/ml	31
Figure 33 - Taux de sédimentation à 6 L/s/ml des différents objets pour le sol tamisé à 1 mm.....	32
Figure 34 - Évolution des coefficients de Manning à 6 L/s/ml des différents objets entre 2014 et 2017	34
Figure 35 - Placette de miscanthus lors des essais de 2013 et 2017	34

Figure 36 - Capacité d'Infiltration à saturation des différentes placettes testées en 2013 et en 2017 pour un débit de 1 L/s ..	36
Figure 37 - Évolution de l'infiltration à saturation pour un débit de 1 L/s/ml entre 2013 et 2017 des modalités testées.....	36
Figure 38- Évolution des taux de sédimentation à 6 L/s/ml des différentes modalités entre 2013 et 2017	39
Figure 39 - Ralentissement dynamique des écoulements à 6 L/s/ml des différents objets exprimé en % des témoins herbe indépendamment à Belleville en Caux/Biville la Baignarde et Sainte Colombe	42
Figure 40 - Taux de sédimentation à 6 L/s/ml des différents objets exprimé en % des témoins	42
Figure 41 - Infiltration à saturation à 1 L/s/ml des différents objets exprimée en % des témoins herbe.....	42

Liste des Tableaux

Tableau 1 : valeurs des paramètres de l'Équation 1	17
Tableau 2 : concentrations moyennes dans les ruissellements en Pays de Caux selon les états de surface, <i>d'après O. CERDAN (2001)</i>	18
Tableau 3 - Comparaison de la granulométrie apparente des matériaux lors des travaux	19
Tableau 4 - Résultats des mesures de frein hydraulique sur les différentes modalités présentes à Belleville-en-Caux, Biville la Baignarde et Sainte Colombe	22
Tableau 5 - Résultats de la capacité d'infiltration à saturation sur les différentes modalités présentes à Belleville-en-Caux, Biville la Baignarde et Ste Colombe.....	25
Tableau 6 - Taux de sédimentation pour le sol tamisé à 1 mm et à 2 mm pour un débit de 6 L/s/ml.....	31
Tableau 7 - Tableau comparatif de la capacité de ralentissement des différentes modalités entre 2013 et 2017	35
Tableau 8 - Tableau comparatif des résultats d'infiltration des différentes modalités entre 2013 et 2017	37