

Résumé long en Français de la thèse de :
Léa KERVROEDAN
17 Décembre 2018



Thèse de Doctorat

*Sciences Écologiques
Écologie et Biogéochimie*

présentée à *l'École Doctorale en Sciences Technologie et Santé (ED 585)*

de l'Université de Picardie Jules Verne

par

Léa Kervroëdan

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Picardie Jules Verne

*Effets des traits et de la diversité fonctionnelle
sur le ruissellement et la rétention des sédiments
Application pour le contrôle de l'érosion des sols
dans les bassins versants agricoles tempérés*

Soutenue le 17 Décembre 2018 après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen :

Mme A. STOKES – Directeur Recherche INRA, HDR (Fr)	Rapporteur
M. C. BIELDERS – Professeur UCL, Dr. (Be)	Rapporteur
M. J. TOURNEBIZE – Chercheur IRSTEA, Dr. (Fr)	Examineur
M. O. CHABRERIE – Maître de conférences UPJV, HDR (Fr)	Examineur
M. G. MAHY – Professeur ULiège, Dr. (Be)	Examineur
M. R. ARMAND – Enseignant-Chercheur UniLaSalle, Dr. (Fr)	Co-directeur
M. M.-P. FAUCON – Directeur Recherche d'UniLaSalle Beauvais, HDR (Fr)	Directeur
M. J.-F. OUVRY – Directeur de l'AREAS, Dr. (Fr)	Membre invité

1. Composition en espèces végétales des haies herbacées et impact sur le ruissellement et l'érosion des sols

1.1. Effets des traits fonctionnels¹ aériens sur la rugosité hydraulique

Dans la ceinture limoneuse européenne, la végétation contrôle le ruissellement et l'érosion concentrés en augmentant la rugosité hydraulique et la rétention des sédiments. Afin de comprendre les mécanismes de contrôle du ruissellement et de l'érosion par les plantes sur la vitesse des écoulements de ruissellement, les études sont généralement basées sur une caractérisation taxonomique et ne tiennent pas compte des effets des traits fonctionnels.

Sachant que le processus principal menant à la réduction de la vitesse de l'écoulement ainsi qu'à la déposition des sédiments, l'objectif de cette étude est de caractériser les effets des traits fonctionnels aériens sur la rugosité hydraulique afin d'identifier les traits fonctionnels aériens induisant une forte rugosité hydraulique.

Cet objectif de recherche correspond aux expérimentations effectuées au cours de l'été 2016.

¹ « Caractéristique morphologique, phénologique ou physiologique mesurable à l'échelle de l'individu (de la cellule à l'organisme entier) sans référence à l'environnement ou tout autre niveau d'organisation » (Violle et al. 2007).

Violle C, Navas M-L, Vile D, et al (2007) Let the concept of trait be functional! *Oikos* 116:882–892. doi: 10.1111/j.2007.0030-1299.15559.x

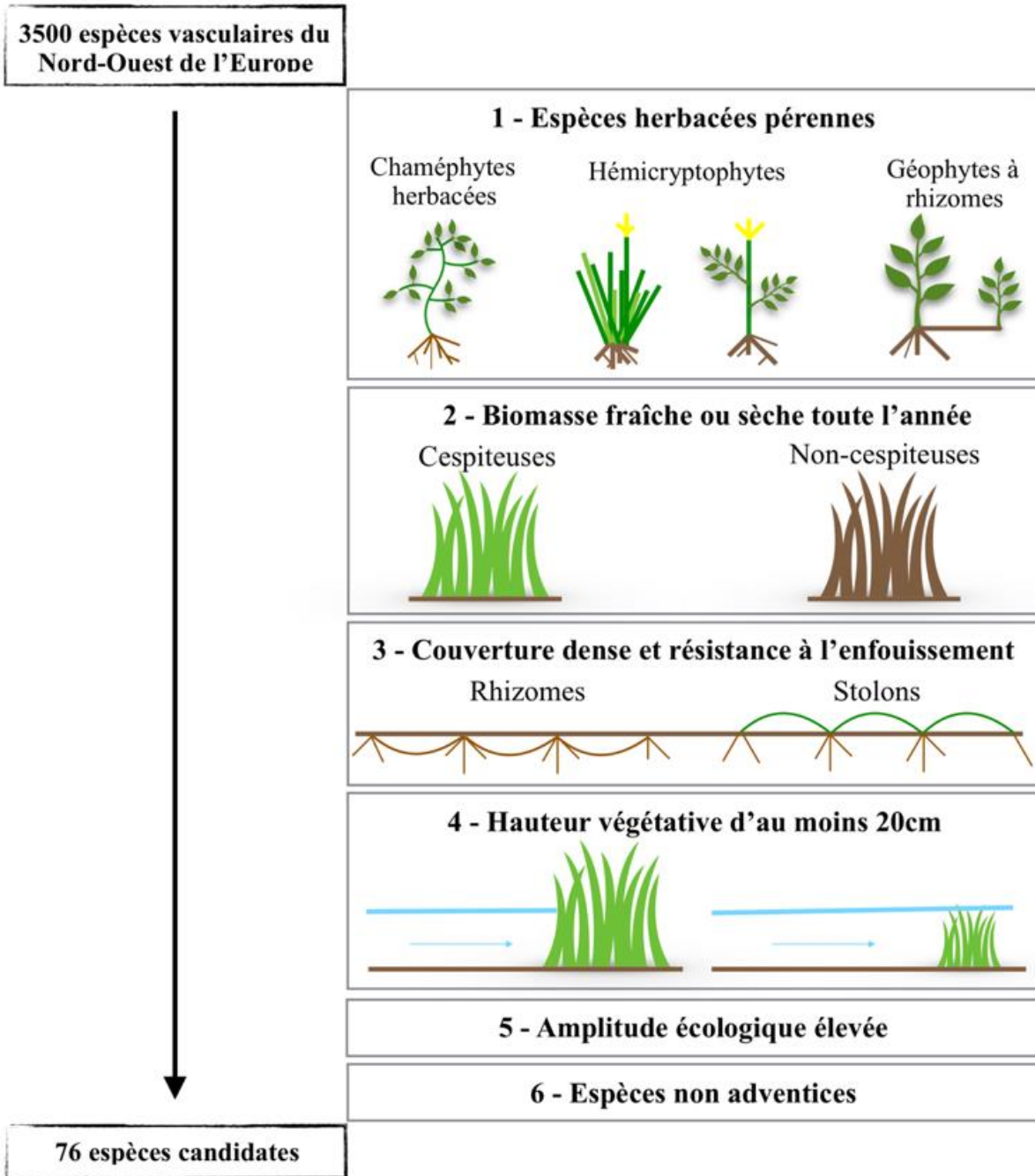


Figure 1. Filtres de sélection pour déterminer la liste d'espèces potentiellement candidates pour créer des haies herbacées dans le Nord-Ouest de l'Europe

1.1.1. Matériels et méthodes

Suite au travail effectué avant la thèse en 2015 sur la liste des 3500 espèces vasculaires du Nord-Ouest de l'Europe, une liste de 76 espèces potentiellement candidates a été établie. La sélection des espèces potentiellement candidates pour concevoir une haie herbacée efficace, afin d'augmenter la rugosité hydraulique et la rétention des sédiments, a nécessité l'identification des types fonctionnels influents et de critères sélectifs : catégories de forme de vie, la persistance de la biomasse pendant l'hiver, le recouvrement du sol, la résistance à l'enfouissement, la hauteur végétative minimale, ainsi que l'amplitude écologique et le non-envahissement des parcelles (**Figure 1**).

Afin d'identifier les espèces efficaces dans la réduction de l'érosion des sols, l'effet des traits fonctionnels sur la rugosité hydraulique a été intégré comme filtre de sélection final. Ce filtre permet de sélectionner les traits ayant un effet sur la rugosité hydraulique et la rétention des sédiments. De plus, la connaissance de la relation entre la rugosité hydraulique et chaque trait permet de déterminer la gamme de variation de chaque trait permettant son efficacité face à l'écoulement. En effet, pour un trait identifié comme significativement corrélé avec la rugosité hydraulique, on peut connaître la gamme de valeur de ce trait pour laquelle il est efficace et ainsi, par mesure sur les potentielles espèces candidates, déterminer quelles espèces font partie de cette gamme de valeur et peuvent être caractérisées comme efficaces.

Afin d'identifier les traits influençant la rugosité hydraulique, 13 espèces de la liste des candidates ont été sélectionnées pour tester l'effet des traits sur la rugosité hydraulique : *Carex sylvatica*, *Carex flacca*, *Carex acutiformis*, *Carex pendula*, *Artemisia vulgaris*, *Origanum vulgare*, *Lolium perene*, *Senecio jacobaea*, *Tanacetum vulgare*, *Festuca arundinacea*, *Dactylis glomerata*, *Melica nutans*, *Phalaris arundinacea*) et 1 espèce de *Miscanthus* : *Miscanthus sinensis*.

Ces espèces ont été choisies pour leur valeurs de traits contrastés (densité de tiges et feuilles ; diamètre, rigidité et taux de matière sèche des tiges ; surface foliaire et surface foliaire spécifique) qui permettaient de tester une vaste gamme de valeurs de traits. Les plantes utilisées ont été prélevées dans la nature pour s'assurer que les placettes testées soient faites d'individus de plus d'un an et que ceux-ci soient représentatifs des populations naturelles. Les espèces ainsi prélevées, ont été plantées dans des bacs en bois de 60 x 30 x 15cm au début Avril 2016 (soit trois mois avant les expérimentations afin d'assurer le bon développement racinaire des plantes). Les bacs étaient faits de planches de bois sur les côtés et un grillage pour le fond afin de laisser passer les racines et avoir un contact avec le substrat du terrain.

Les essais et mesures de traits ont été réalisés sur les mois de Juin et Juillet 2016. Chaque trait, excepté pour les densités de tiges et foliaires, a été mesuré sur trois paliers de hauteurs (0 – 5cm, 0 – 10cm et 0 – 20 cm) afin de déterminer s’il y avait un effet de la hauteur du trait sur la rugosité hydraulique. Les densités de tiges et de feuilles ont été déterminées sur deux quadrats de 1dm² au sein d’une placette. La rigidité, le diamètre et le taux de matière sèche ont été mesurés sur trois tiges représentatives par quadrat. Enfin, la surface foliaire et SLA ont été déterminées sur six feuilles représentatives de la communauté par placette. De plus, chaque trait a été pondéré par la densité de tiges (pour les traits de tiges) ou par la densité de feuilles (pour les traits foliaires), afin d’avoir une idée de leur poids dans la communauté végétale (**Figure 2**).

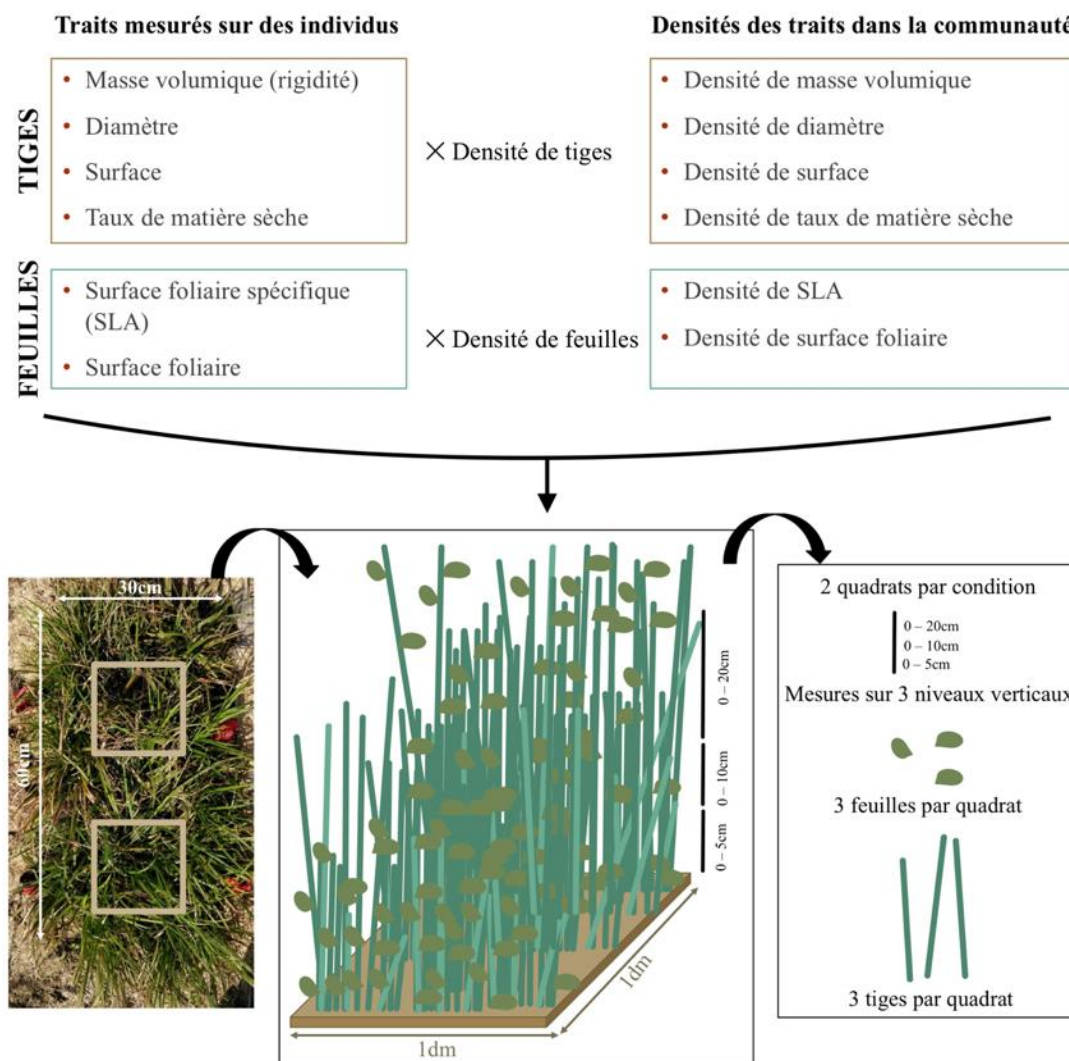


Figure 2. Traits mesurés et méthodes de mesures et d'échantillonnage

Les essais consistaient à la recréation d'écoulements concentrés en conditions contrôlées, à l'aide du simulateur de ruissellement de l'AREAS, afin d'évaluer les rugosités hydrauliques associées à chaque condition. La partie supérieure du simulateur est constituée d'une arrivée d'eau par pompe et d'un canal étroit avec un débitmètre. La partie centrale est un canal de 60cm de large sur 5,4m de long, rendu étanche par une bâche sur tout son long, pour ne mesurer que la rugosité hydraulique et éviter les pertes par infiltration. La placette est disposée à 4m de l'entrée d'eau dans le canal, laissant 1,4m de canal en aval. À partir d'1,46m de canal, des entretoises ont été disposées tous les 0,75m afin de mesurer les hauteurs d'eau et la topographie (5 en amont de la haie et 2 en aval). La partie aval au canal central est un autre canal étroit, similaire à celui en amont, comprenant lui aussi un débitmètre. Le circuit est fermé : l'eau entrant dans le système est envoyée dans un réservoir et est ensuite réutilisée (**Figure 3**).

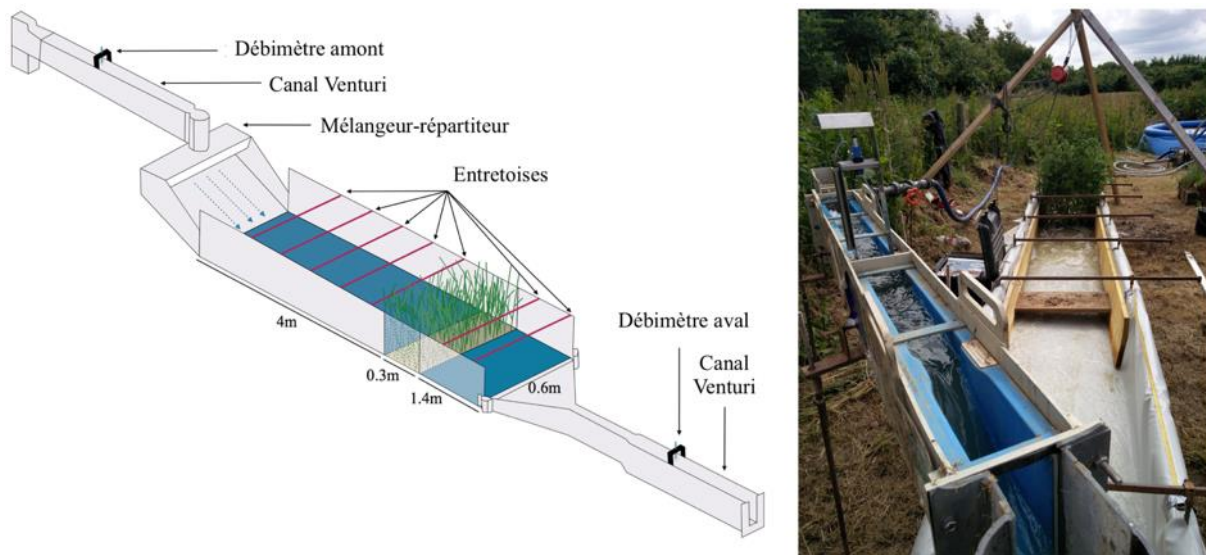


Figure 3. Simulateur de ruissellement de l'AREAS

Les débits choisis sont représentatifs du Pays de Caux, trouvés de tous les 0,5 à 5 ans pour un bassin versant de 5ha avec un thalweg de 5m : 2 – 4 – 8 et 11 $L.s^{-1}.m^{-1}$ à $\pm 0.5 L.s^{-1}.m^{-1}$.

Pour chaque placette à chaque débit, les hauteurs d'eau en amont et aval de la haie ont été mesurées afin de déterminer le profil du flux, ainsi que la rugosité hydraulique de celui-ci. Ainsi, l'indice « Unit Stream Power » (USP) a été calculé pour caractériser la rugosité hydraulique en amont de la haie, et donc son efficacité (plus l'USP est bas, plus l'efficacité est forte). L'USP se définit comme étant « la dissipation d'énergie par unité de temps et par unité de masse de l'écoulement » (Govers 1992)², et est fréquemment utilisé dans la détermination de la capacité de transport des particules d'un flux. Il dépend de la vitesse moyenne de l'écoulement (V en $m.s^{-1}$) et de la pente du chenal (S en $m.m^{-1}$) : $USP = V \times S$.

² Govers G (1992) Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials. Earth surface processes and landforms 17:515–528

1.1.2. Résultats entre les traits

Dans un premier temps, les relations entre les traits ont été mises en évidence par analyse en composantes principales. Elles soulignent les regroupements des traits suivants, présentant un comportement similaire (**Figure 4**) :

- la surface foliaire (LA) et le diamètre des tiges (SDm)
- la surface foliaire spécifique (SLA) et la rigidité de tige (SSD)
- la hauteur de tige (SH) et le taux de matière sèche des tiges (SDMC)
- la densité de feuille (LD) et la densité de tige (SD)

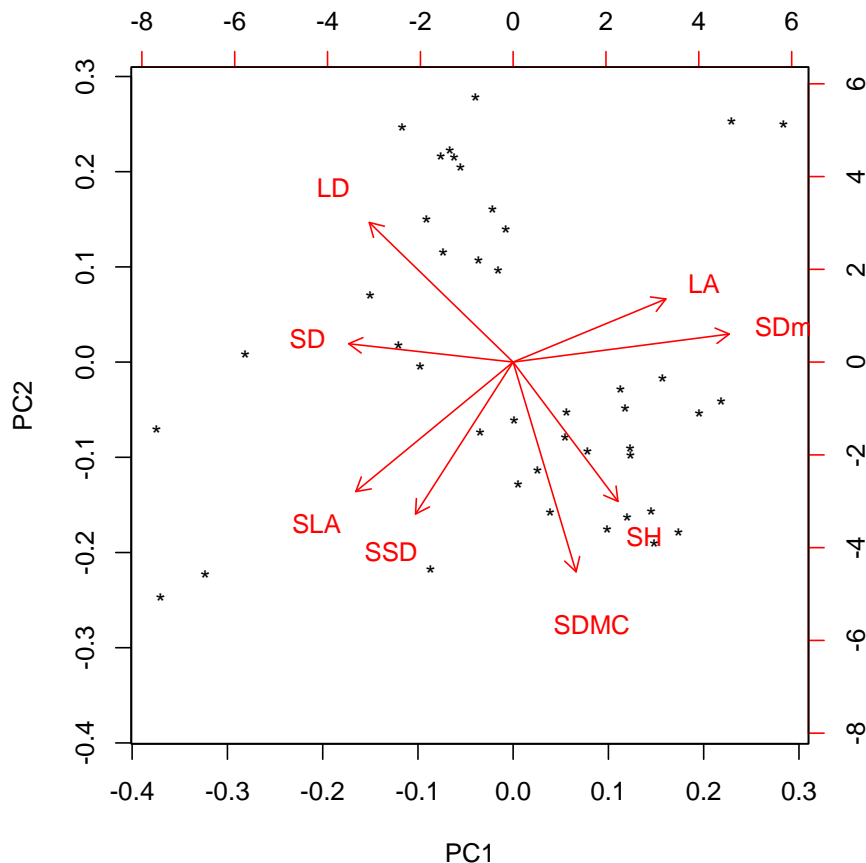


Figure 4. Résultat ACP avec PC1 expliqué à 36,05% et PC2 à 27,63% - LD : densité des feuilles ; SD : densité des tiges ; SSD : rigidité des tiges ; SDMC : taux de matière sèche ; SH : hauteur végétative des tiges ; SDm : diamètre des tiges ; LA : surface foliaire

Dans un second temps, les relations entre les traits et la rugosité hydraulique ont été analysées par analyses uni-variées, identifiant les traits significativement corrélés à l'USP pour chaque débit (Q) (**Tableau 1, en gris**). Un léger effet débit apparaît pour certains traits mais pour la plupart, la relation est la même pour tous les débits.

Ainsi, afin de choisir les espèces candidates les plus efficaces dans la réduction du ruissellement et de l'érosion du sol, il faut focaliser les mesures sur la surface foliaire ; les densités de feuilles aux trois paliers ; les densités de surface foliaire, de surface des tiges, de diamètre et de surface de plants aux trois paliers ; et densité de SLA entre 0-5cm et 0-10cm.

Tableau 1. : Première identification des traits et des densités de traits impactant la rugosité hydraulique

	Palier de hauteur	USP_Q1	USP_Q2	USP_Q3	USP_Q4
		p-value	p-value	p-value	p-value
Surface foliaire		0.025127	0.033150	NS	NS
Densité de feuilles	0-5cm	0.0134	0.0064	0.00914	0.00511
	0-10cm	0.0212	0.0108	0.0119	0.00847
	0-20cm	NS	NS	0.042794	0.036257
Densité de tiges		NS	NS	NS	NS
Taux de matière sèche des tiges		NS	NS	NS	NS
Diamètre des tiges	0-5cm	NS	NS	NS	NS
	0-10cm	NS	NS	NS	NS
	0-20cm	NS	NS	NS	NS
SLA		NS	NS	NS	NS
Rigidité des tiges	0-5cm	NS	NS	NS	NS
	0-10cm	NS	NS	NS	NS
	0-20cm	NS	NS	NS	NS
Densité de surface foliaire	0-5cm	0.0025	0.00119	0.00393	0.00103
	0-10cm	0.00271	0.00178	0.00539	0.00114
	0-20cm	0.00314	0.00255	0.00648	0.00109
Densité de surface tige	0-5cm	0.007111	0.001893	0.001422	0.00278
	0-10cm	0.00869	0.00259	0.002063	0.00376
	0-20cm	0.0238	0.0112	0.00964	0.015606
Densité de taux matière sèche		NS	NS	NS	NS
Densité de diamètre tiges	0-5cm	0.007111	0.001893	0.001422	0.00278
	0-10cm	0.00833	0.00242	0.001920	0.00352
	0-20cm	0.0108	0.00376	0.003163	0.005477
Densité de SLA	0-5cm	0.0242	0.0102	0.0115	0.0073
	0-10cm	NS	0.0485	0.0381	0.0377
	0-20cm	NS	NS	NS	NS
Densité de rigidité	0-5cm	NS	NS	NS	NS
	0-10cm	NS	NS	NS	NS
	0-20cm	NS	NS	NS	NS

Enfin, les combinaisons de traits et de densités de traits impactant le plus fortement la rugosité hydraulique ont été mises en évidence par analyses multivariées. **Ces analyses démontrent les rôles principaux des combinaisons suivantes :**

- **Surface foliaire et densité de feuilles ;**
- **Densité de surface foliaire et densité de diamètre des tiges ;**
- **Densité de surface foliaire et densité de surface de tiges.**

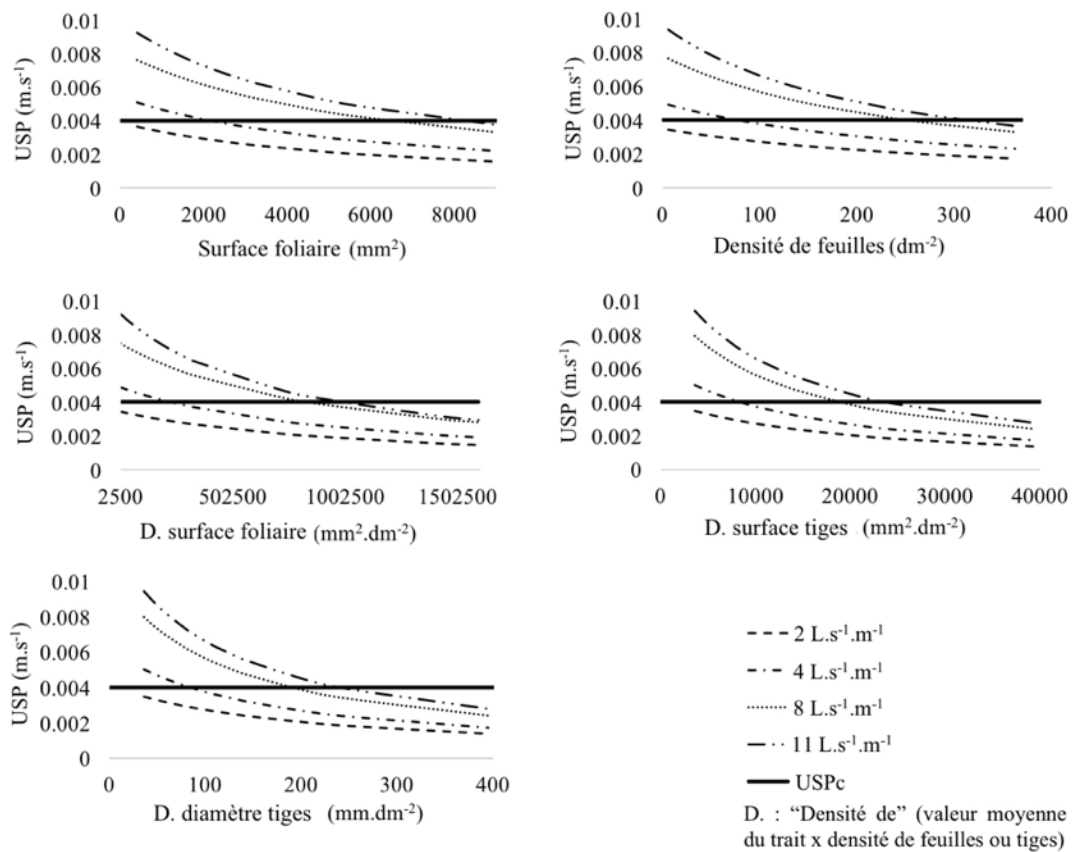


Figure 5. Relations entre les valeurs d'USP, de traits et densités de traits intégrant la valeur d'USP critique (USPc).

Tableau 2. Valeurs seuils de chaque trait et densité de trait à partir desquelles il y a un effet sur la rugosité hydraulique

	2 L.s ⁻¹ .m ⁻¹	4 L.s ⁻¹ .m ⁻¹	8 L.s ⁻¹ .m ⁻¹	11 L.s ⁻¹ .m ⁻¹
Surface foliaire (mm ²)	200	2200	6500	8200
Densité de feuilles (dm ⁻²)	0	70	250	310
Densité de surface foliaire (mm ² .dm ⁻²)	2000	227500	820000	1000000
Densité de surface de tiges (mm ² .dm ⁻²)	2000	8400	18750	23500
Densité de diamètre des tiges (mm.dm ⁻²)	20	80	190	230

Concernant les traits « simples », **il y a un meilleur effet quand la surface foliaire et la densité de feuilles sont combinées dans l'analyse**. Cela signifie qu'il vaut mieux baser la sélection sur des espèces comprenant le meilleur compromis entre de large feuilles et une densité de feuilles élevée. De plus, lorsque l'on s'intéresse au poids des traits au sein de la végétation (densité de traits), **il vaut mieux sélectionner des espèces se développant en communauté avec des tiges de large diamètre et de grandes feuilles**.

1.1.3. Implications

La finalisation du processus de sélection nécessite l'application d'un filtre supplémentaire intégrant les traits fonctionnels impliqués dans la rugosité hydraulique et la rétention des sédiments. Les seuils de valeurs de chaque trait et de chaque densité de trait à partir desquels il y a un effet sur la rugosité hydraulique sont identifiés par l'utilisation de la valeur critique d'USP (USPc), déterminée par Govers (1990)³ a été utilisée (**Figure 5, Tableau_2**). Cette valeur est de $0,004 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et représente la valeur à partir de laquelle le sol est susceptible de s'éroder (pour un sol nu constitué des particules avec un diamètre médian entre $58 \mu\text{m}$ et $218 \mu\text{m}$ et de pente entre 1° et 8°). Au-dessus de cette valeur, la capacité d'arrachage des particules de sol va augmenter et en dessous, la capacité de transport des particules devient progressivement limitée. Ainsi, les plantes (et les végétations) possédant les valeurs de traits (et de densité de traits) en dessous de la ligne d'USPc sont efficaces pour réduire la vitesse du flux et favoriser la sédimentation.

Parmi les espèces testées, celle qui présentait la résistance hydraulique la plus élevée pour la plupart des débits était *Carex pendula* ; tandis que l'espèce présentant la plus faible résistance hydraulique était *Origanum vulgare*. Ces deux espèces présentaient une combinaison distinctive de valeurs de traits correspondant à leur résistance hydraulique contrastée (**Figure 6**).

³ Govers G (1990) Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. Int. Assoc. Hydrol. Sci. 189:45–63

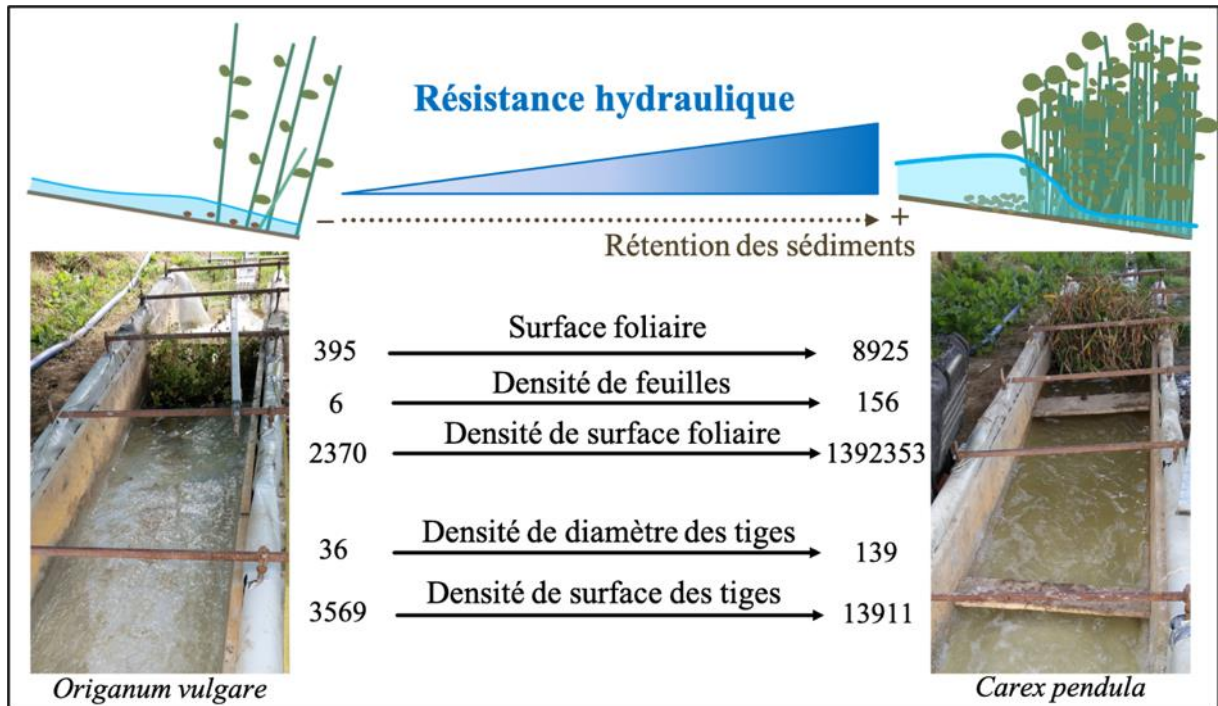


Figure 6. Deux extrêmes parmi les espèces testées présentant la rugosité hydraulique la plus faible et la plus élevée : application de leurs valeurs de traits aériens pour la sélection des espèces candidates.

En utilisant à la fois les combinaisons efficaces et les valeurs de seuil identifiées, la liste de 76 espèces potentiellement candidates a pu être réduite aux espèces les plus intéressantes pour créer des haies herbacées dans le nord-ouest de l'Europe (**Tableau 3**). Les gradients de + à ++++ représentent les gradients d'efficacité, de très faibles à très efficaces, dans l'augmentation de la rugosité hydraulique.

Ces gradients ont été identifiés par une estimation basée sur les traits impliqués dans l'augmentation de la rugosité hydraulique et sur des observations botaniques de terrain. Ces gradients représentent l'efficacité de l'espèce dans des conditions mono-spécifiques et changeraient si l'espèce était placée dans des conditions multi-spécifiques.

Tableau 3. Espèces candidates pour créer des haies herbacées pour contrôler le ruissellement et l'érosion des sols

Famille	Nom des espèces	Efficaces pour les débits	
		Faibles	Forts
Adoxaceae	<i>Sambucus ebulus L.</i>	+	++
Apiaceae	<i>Anthriscus sylvestris (L.) Hoffmann</i>	+	+
	<i>Bupleurum falcatum L.</i>	+	+
	<i>Heracleum sphondylium L.</i>	+	+
Asteraceae	<i>Achillea ptarmica L.</i>	+	+
	<i>Artemisia verlotiorum</i>	+	+
	<i>Artemisia vulgaris L.</i>	+	+
	<i>Aster laevis L.</i>	+	+
	<i>Aster salignus Willd.</i>	+	+
	<i>Eupatorium cannabinum L.</i>	+	++
	<i>Hieracium piloselloides Vill.</i>	+	+
	<i>Senecio jacobaea L.</i>	+	+
	<i>Tanacetum corymbosum L.</i>	+	+
Caryophyllaceae	<i>Tanacetum parthenium L.</i>	+	+
	<i>Tanacetum vulgare L.</i>	+	+
	<i>Saponaria officinalis L.</i>	+	
Clusiaceae	<i>Hypericum perforatum L.</i>	+	+
Cyperaceae	<i>Carex acutiformis Ehrh.</i>	++++	++++
	<i>Carex binervis Smith</i>	++	+
	<i>Carex brizoides L.</i>	++	++
	<i>Carex canescens L.</i>	++	++
	<i>Carex otrubae Podp.</i>	++	++
	<i>Carex diandra Schrank</i>	++	+
	<i>Carex distans L.</i>	+	+
	<i>Carex divulsa Stokes</i>	++++	+++
	<i>Carex elongata L.</i>	++++	+++
	<i>Carex flacca Schreb.</i>	++	+
	<i>Carex flava L.</i>	+	+
	<i>Carex paniculata L.</i>	++++	+++
	<i>Carex pendula Huds.</i>	++++	++++
	<i>Carex pilosa Scop.</i>	+	+
	<i>Carex pseudocyperus L.</i>	++++	++++
	<i>Carex remota Jusl. ex L.</i>	++	+
	<i>Carex spicata Huds.</i>	+	+
<i>Carex strigosa Huds.</i>	++	+	
<i>Carex sylvatica Huds.</i>	+++	++	
<i>Carex vulpina L.</i>	++	+	

Lamiaceae	<i>Calamintha nepeta</i> (L.) Savi	+	+
	<i>Clinopodium vulgare</i> L.	+	+
	<i>Mentha longifolia</i> L.	+	+
	<i>Mentha spicata</i> L.	+	+
	<i>Mentha suaveolens</i> Ehrh.	+	+
	<i>Origanum vulgare</i> L.	+	+
Linaceae	<i>Linum perenne</i> L.	+	
Papaveraceae	<i>Meconopsis cambrica</i> (L.) Vig.	+	+
Poaceae	<i>Agrostis gigantea</i>	+++	++
	<i>Arrhenatherum elatius</i> L.	+++	++
	<i>Brachypodium pinnatum</i> (L.) Beauv.	+++	+++
	<i>Brachypodium sylvaticum</i> (Huds.) Beauv.	++	+
	<i>Bromus erectus</i> Huds.	+++	++
	<i>Bromus inermis</i> Leyss.	+++	++
	<i>Bromus ramosus</i> Huds.	+	+
	<i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth	++++	++++
	<i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth	++++	++++
	<i>Calamagrostis varia</i> (Schrad.) Host	++++	++++
	<i>Calamagrostis villosa</i> (Chaix ex Vill.) J.F. Gmel.	+++	++
	<i>Cynosurus cristatus</i> L.	+++	++
	<i>Dactylis glomerata</i> L.	++++	++++
	<i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) Beauv.	++++	++++
	<i>Deschampsia flexuosa</i> (L.) Trin.	++	++
	<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	++++	++++
	<i>Festuca gigantea</i> (L.) Vill.	+++	++
	<i>Festuca heteropachys</i> (St-Yves) Patzke ex Auquier	++	+
	<i>Festuca heterophylla</i> Lam.	++	+
	<i>Festuca longifolia</i> Thuill.	++	+
	<i>Festuca marginata</i> (Hack.) K. Richt.	+	+
	<i>Festuca polesica</i> Zapal.	+	+
	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	++++	++++
	<i>Festuca rubra</i> L.	+++	+++
	<i>Koeleria pyramidata</i> (Lam.) Beauv.	++	+
	<i>Melica ciliata</i> L.	+	
	<i>Melica nutans</i> L.	+	
<i>Melica uniflora</i> Retz.	+		
<i>Milium effusum</i> L.	+	+	
<i>Phalaris arundinacea</i> L.	+++	+++	
Rosaceae	<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.	+	+

Parmi les résultats obtenus, il est montré que **les plantes comprenant des surfaces foliaires et des densités de feuilles élevées seront efficaces** pour réduire la vitesse de l'écoulement ; **cependant, ces deux traits sont négativement associés** (de même que le diamètre et la densité de tiges). En effet, plus le nombre de feuille augmente et plus la surface foliaire diminue (par soucis d'occupation de l'espace) ; et plus le diamètre augmente et moins il peut y avoir de tiges. **Par conséquent, il est important de considérer des haies herbacées présentant des espèces différentes, notamment d'avoir des espèces monocotylédones et dicotylédones, afin de pouvoir se rapprocher au maximum de la valeur de traits optimale pour augmenter efficacement la rugosité hydraulique, et donc augmenter la capacité de rétention de sédiments de la haie herbacées.**



Carex flacca

Tanacetum vulgare

Festuca arundinacea

Phalaris arundinacea



Mixte à 3 espèces (CTF)



Mixte à 4 espèces (CTFP)



Figure 7. Description des conditions expérimentales testées

1.2. Effets de la diversité fonctionnelle sur la rugosité hydraulique

Les effets de la diversité fonctionnelle sur les processus écosystémiques tels que le ruissellement et l'érosion des sols, principaux processus naturels influençant la dynamique de la végétation et le fonctionnement des écosystèmes, ne sont pas encore totalement compris. Les végétations avec une forte densité de tige et de larges diamètres de tiges (tous deux corrélés négativement), ainsi que d'importantes surfaces foliaires et densités de feuilles (toutes deux corrélées négativement), ont un impact sur la rugosité hydraulique.

L'objectif est de caractériser les effets de la diversité fonctionnelle⁴ sur la rugosité hydraulique afin de comprendre si ces effets (1) sont induits par une dominance ou un effet de complémentarité des traits dans la communauté et (2) induisent une meilleure efficacité dans le contrôle de l'érosion et des écoulements concentrés que des haies herbacées mono-spécifiques.

Cet objectif de recherche correspond aux expérimentations effectuées au cours de l'été 2016.

1.2.1. Matériels et méthodes

Cet essai a été réalisé dans les mêmes conditions que l'essai présenté en 1.1, avec les mêmes débits utilisés et les mêmes traits mesurés au sein des placettes. Il comptait 6 conditions avec 3 réplicats de chaque condition (**Figure 7**) :

- 4 mono-spécifiques avec 4 espèces différentes : *Carex flacca*, *Tanacetum vulgare*, *Festuca arundinacea* et *Phalaris arundinacea*
- 2 multi-spécifiques avec un mixte des 4 espèces précédemment citées, et un mixte de 3 espèces (*Carex flacca*, *Tanacetum vulgare* et *Festuca arundinacea*)

Tout le matériel végétal (hormis pour le *Carex flacca*) a été prélevé dans la nature afin de tester des placettes comprenant des individus de plus d'un an et représentatifs des populations naturelles. Le *Carex flacca* a été fourni par un pépiniériste.

La rugosité hydraulique a été caractérisée par l'USP (voir 1.1.1 pour plus de détails).

⁴ « La valeur, la gamme et l'abondance relative des traits fonctionnels dans un écosystème donné » (Díaz et al. 2007).

Díaz S, Lavorel S, Chapin FS, et al (2007) Functional Diversity — at the Crossroads between Ecosystem Functioning and Environmental Filters. In: Canadell JG, Pataki DE, Pitelka LF (eds) Terrestrial Ecosystems in a Changing World. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 81–91

1.2.2. Résultats

Les analyses sont distinguées en deux parties :

- Les comparaisons entre la moyenne des placettes dites « mono-spécifiques » et de celles dites « multi-spécifiques », en séparant les mixtes à 3 et 4 espèces dans deux sets de comparaisons distincts (Figure 8) ;
- Les comparaisons entre chacune des conditions (Figure 9).

Les résultats des comparaisons entre la moyenne des conditions mono-spécifiques et les conditions multi-spécifiques ne montrent pas de différences significatives, indiquant **un effet dominant des traits d'une ou plusieurs espèces dans la communauté végétale**.

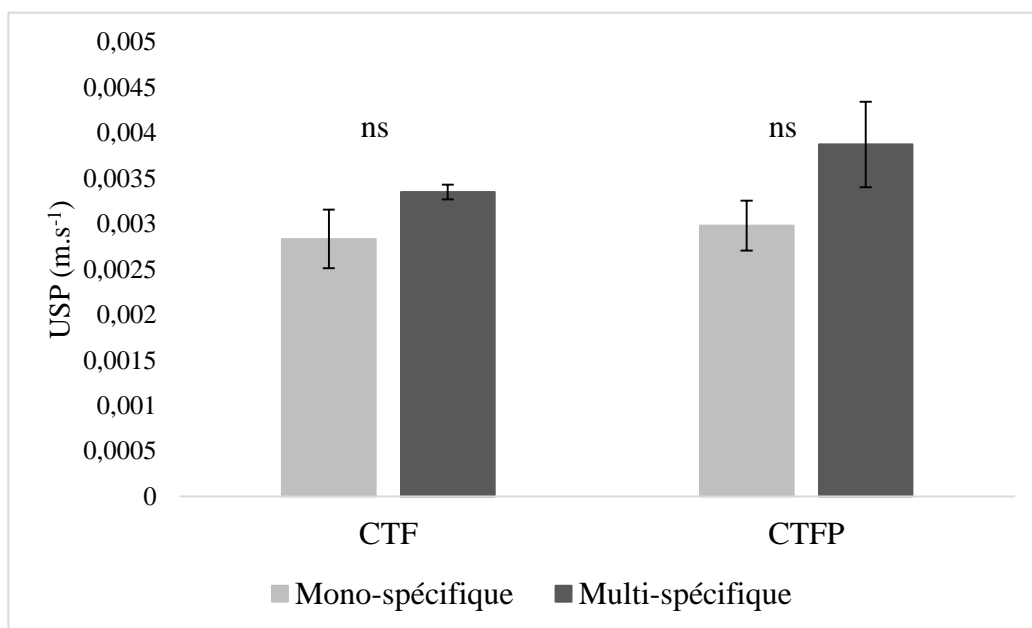


Figure 8. Différences entre les communautés mono-spécifiques et multi-spécifiques sans considérer le espèce au débit $2 \text{ L.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$. Les barres représentent les valeurs moyennes \pm erreur standard. Des résultats similaires sont trouvés pour chaque débit testé.

Afin d'identifier l'origine de cet effet de dominance, une comparaison entre chaque condition a été faite et les résultats indiquent que seule *Festuca arundinacea* en monoculture présente une différence significative avec les autres conditions. **Ces résultats montrent un effet de dominance des traits de la fétuque plutôt qu'un effet de complémentarité des traits présents dans la communauté**. L'effet des communautés multi-spécifiques est donc fortement influencé par les traits fonctionnels de la fétuque. Les résultats d'analyses de comparaison de valeurs de traits pondérés au niveau de la communauté (calculés à partir de la valeur d'un trait et de l'abondance de l'espèce le portant dans la communauté) montrent que les densités de feuilles pondérées à la communauté (0 – 10 cm) et (0 – 20 cm) de *Festuca arundinacea* génèrent l'effet de dominance sur la rugosité hydraulique.

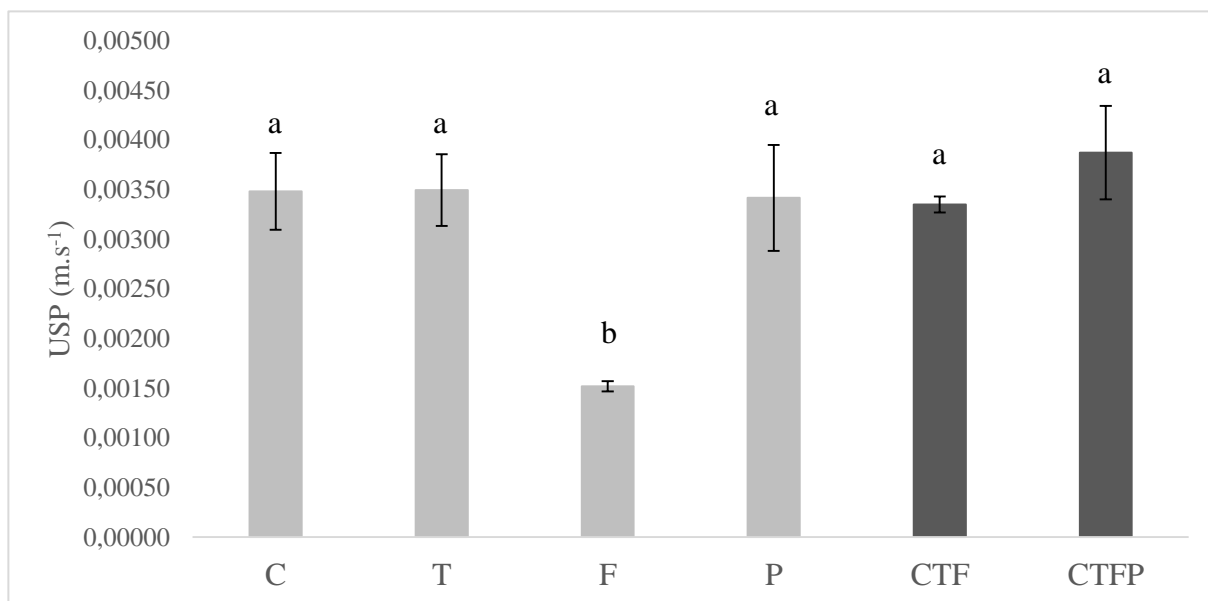


Figure 9. Différences entre chaque condition au débit $2 \text{ L.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$. Les barres représentent les valeurs moyennes \pm erreur standard. Des résultats similaires ont été trouvés pour chaque débit testé.

1.2.3. Implications

Bien qu'un effet dominant des traits d'une espèce dans la communauté ait été trouvé, plutôt qu'un effet synergétique des traits, **aucun effet négatif de la diversité fonctionnelle n'a été mis en avant.**

L'efficacité des haies herbacées multi-spécifique dépend des espèces utilisées, et plus particulièrement des espèces présentant une forte densité de feuilles, qui vont avoir tendance à dominer l'effet de la haie herbacées sur la rugosité hydraulique et la rétention des sédiments. Il est aussi important d'intégrer des espèces qui présentent des diamètres de tige larges, afin d'augmenter la surface de contact avec le flux au niveau du sol. **La mise en place de ces haies devrait donc inclure des espèces de type graminées qui présentent une forte densité foliaire et une grande surface de contact** (type *Carex*, par exemple). **La présence d'espèces dicotylédones en petite abondance permettrait de renforcer la rigidité de la haie herbacée.**

Utiliser de telles haies herbacées multi-spécifiques permettrait de créer une haie herbacée multifonctionnelle qui procurerait des services écosystémiques et techniques supplémentaires à ceux de contrôle de l'érosion et des écoulements concentrés (création d'habitat, restauration de corridors écologiques, limitation de la destruction totale de la haie herbacée en cas de dérive d'herbicides, etc.).

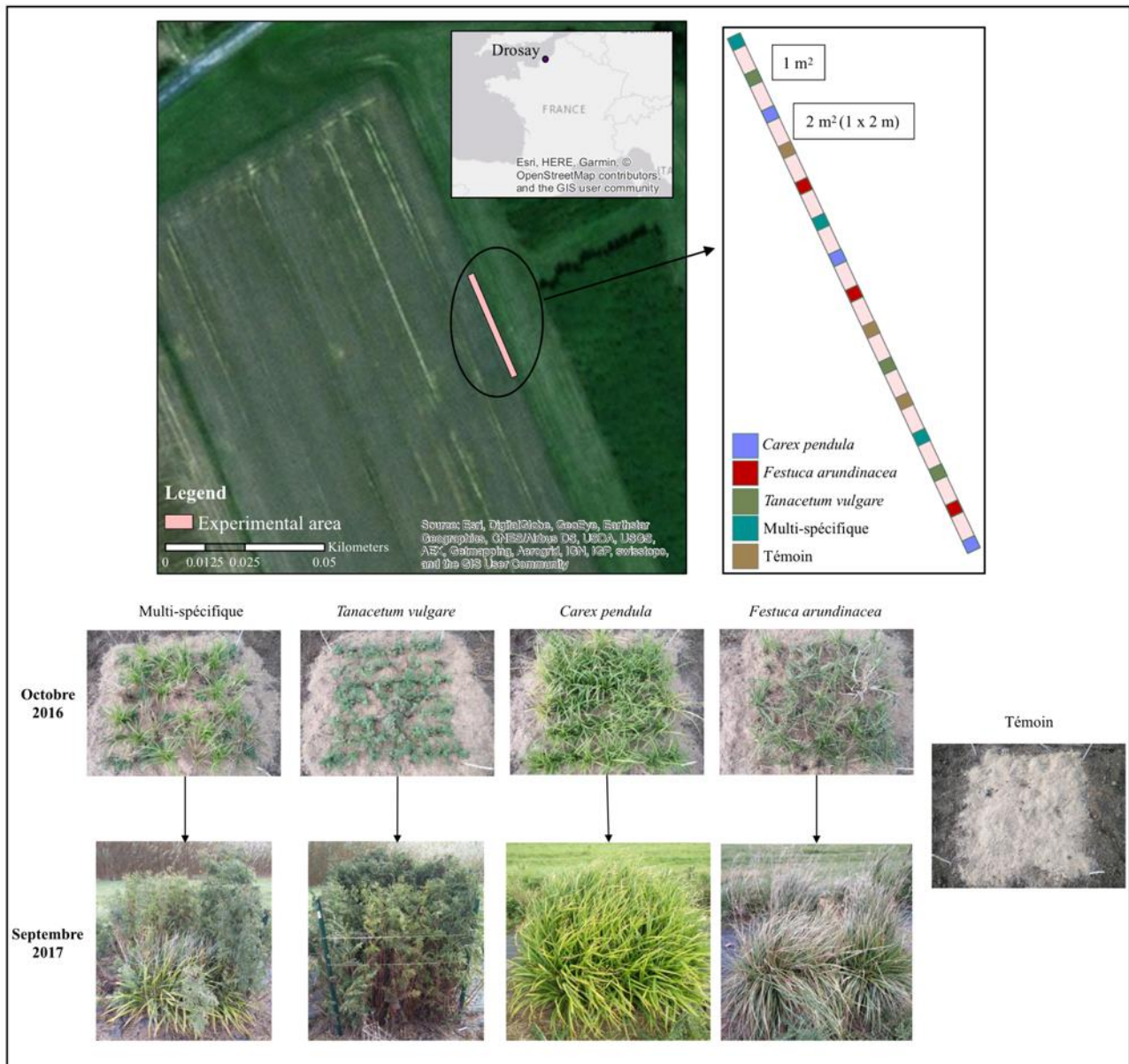


Figure 10. Description des conditions expérimentales de l'expérimentation in-situ

1.3. Effet de la diversité fonctionnelle sur la rétention des sédiments – expérimentation *in-situ*

L'objectif de comprendre et mesurer si l'effet de complémentarité de traits contrastés dans une communauté végétale en condition d'implantation entraîne une meilleure efficacité sur l'augmentation la rétention des sédiments, grâce à une meilleure utilisation des ressources et de l'espace.

Cet objectif de recherche correspond aux expérimentations faites pendant les mois d'Octobre et de Novembre 2017.

1.3.1. Matériels et méthodes

Les placettes ont été implantées sur le bord inférieur d'une parcelle limoneuse cultivée avec du blé d'hiver situé dans la municipalité de Drosay (**Figure 10**). Le sol, défini comme luvisol, est caractérisé par 12,5% ($\pm 0,66\%$) d'argile, 64,3% ($\pm 0,84\%$) de limon, 23,2% ($\pm 0,64\%$) de sable et un indice de battance de 1,8 ($\pm 0,08$) (d'après les calculs de Rémy et Marin-Laflèche 1974⁵).

Les placettes ont été mises en place le jeudi 13 octobre 2016, soit un an avant les expérimentations de simulation de ruissellement, les plantes étaient plantées dans des parcelles de 1 m² d'une densité de 53 semis.m⁻². Les placettes multi-spécifiques ont été plantées avec la même proportion de chaque espèce et les semis ont été placés de manière à ce que les semis de la même espèce ne soient pas côte à côte. Une parcelle témoin, sans végétation, a également été testée avec trois répétitions. Chaque parcelle était répartie au hasard sur une bande de 50 m et il restait 2 m entre chaque parcelle pour permettre le mouvement et limiter la propagation des plantes dans la parcelle suivante.

Cet essai comptait 5 conditions, avec 3 réplicats : 3 conditions mono-spécifiques, 1 condition multi-spécifique et 1 condition témoin ; utilisant trois espèces : *Carex pendula*, *Festuca arundinacea* et *Tanacetum vulgare* (**Figure 10**). Les traits ont été mesurés au sein d'un quadrat de 10cm de côté dans chaque placette mono-spécifique, et dans un quadrat pour chaque espèce dans les placettes multi-spécifiques. Les traits mesurés étaient les suivant :

- Tiges : diamètre (sur 3 tiges) et densité ;
- Feuilles : Surface foliaire, surface foliaire spécifique (SLA) et densité.

⁵ Rémy JC, Marin-Laflèche A (1974) L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. Annales Agronomiques 25:607–632

Les paliers de hauteur ont été appliqués pour les mesures des traits (0 – 5 cm, 0 – 10 cm et 0 – 20 cm). De plus, les recouvrements de chaque espèce ont été quantifiés dans les placettes multi-spécifiques afin de déterminer l'abondance des espèces. La biomasse aérienne a été prélevée au sein d'un quadrat de 50 cm de côté par placette, puis séchée à 70°C pendant 72h et pesée (chaque espèce a été séparée pour les placettes multi-spécifiques).

Les expérimentations étaient composées de deux parties :

- Effet sur la rugosité hydraulique par un envoi d'eau claire sur 3 débits (2 ; 4 et 8 L.s⁻¹.m⁻¹).
- Effet sur la rétention des sédiments avec un envoi de sédiments avec une concentration solide de 11 g.L⁻¹ (± 0.36 g.L⁻¹) pour un débit de 3.6 L.s⁻¹.m⁻¹ (± 0.09 L.s⁻¹.m⁻¹).

Les sédiments utilisés lors de la deuxième partie des expérimentations ont été prélevés dans la même parcelle que les essais. Ils ont ensuite été tamisés à 2mm, afin d'éliminer les particules grossières et d'homogénéiser les sédiments, ont été séchés à 40°C pendant 72h et conditionnés hermétiquement dans des bidons jusqu'aux essais. Chaque bidon contenait 6,48 Kg de sédiments. Au cours des essais, les sédiments ont été envoyés sur une période de 3minutes (à ± 15sec). Des prélèvements en amont et en aval ont été faits toutes les 15 secondes à partir de l'envoi des sédiments et jusqu'à 30 secondes après la fin d'écoulement des sédiments, afin de contrôler et de déterminer les concentrations entrantes et sortantes de la haie. La quantité des sédiments déposés dans le canal en amont de la haie a été entièrement collectée afin de la quantifier et d'analyser la granulométrie des sédiments retenus.

Les échantillons prélevés en amont, dans le canal et en aval des plantes ont été laissés décanter pour permettre aux sédiments de se déposer dans le fond des piluliers et bacs. Une série d'analyses a ensuite été appliquée sur les 420 piluliers des échantillons amont et aval :

- les piluliers pleins ont été pesés et ont été ensuite vidés de la majorité de leurs eaux pour récupérer les sédiments ;
- les piluliers vides ont été séchés à l'étuve à 40°C pendant 72h et pesés ;
- les sédiments ont été séchés à l'étuve à 105°C pendant 48h et pesés.

Les 33 bacs de prélèvements des sédiments dans le canal ont été vidés et les sédiments récupérés ont été séchés à 105°C à l'étuve pendant 48h et pesés.

Une partie des sédiments récoltés en aval de la haie et dans le canal a été envoyée pour analyses granulométriques particulières dans le Laboratoire d'Analyses des Sols et des Formations Superficielles du CNRS de Strasbourg.

1.3.2. Résultats

Tout comme présenté au paragraphe **1.2.3**, les analyses se sont divisées en deux parties, pour la rugosité hydraulique et les quantités de sédiments :

- comparaisons entre la moyenne des placettes dites « mono-spécifiques » et de celles dites « multi-spécifiques » (**Figure 11**) ;
- comparaisons entre chacune des conditions (**Figure 12**).

Des comparaisons similaires ont aussi été faites pour comparer les tailles de sédiments retrouvées dans le canal (amont) et en aval de la haie herbacée (**Figure 13**).

(Les 3 graphiques sont placés sur les pages suivantes.)

Les résultats des comparaisons entre la moyenne des conditions mono-spécifiques et les conditions multi-spécifiques ne montrent pas de différences significatives que ce soit pour la rugosité hydraulique ou pour les quantités de sédiments retenues, **ce qui indique un effet dominant des traits d'une ou plusieurs espèces dans la communauté végétale**. L'analyse approfondie par comparaison entre les conditions a montré que seule *Tanacetum vulgare* en monoculture présente une différence significative avec la condition multi-spécifique, pour la rugosité hydraulique et la rétention des sédiments. **Ces résultats montrent donc un effet de dominance des traits de la tanaïsie qui influencent l'efficacité des communautés multi-spécifiques**. Les résultats d'analyses de comparaison de valeurs de traits pondérés à la communauté montrent que la densité de feuilles et la surface foliaire pondérées à la communauté de *Tanacetum vulgare* engendrent l'effet de dominance sur la rugosité hydraulique et la rétention des sédiments.

Considérant les tailles des particules de sédiments retrouvées à l'amont et à l'aval des haies herbacées, il n'y avait pas de différence entre chaque condition.

Cependant, pour *C. pendula*, les catégories de tailles de particules entre 20 µm et 50 µm et entre 50 µm et 100 µm en amont de la haie herbacée étaient différentes de celles en aval (**Figure 13.A**). Pour la condition *T. vulgare*, la quantité de sédiments de la catégorie 20 µm à 50 µm en amont de la haie herbacée était significativement inférieure à celle en aval (**Figure 13.C**). La quantité de sédiments entre 100 µm et 200 µm était significativement plus élevée en amont qu'en aval des haies herbacées multi-spécifiques (**Figure 13.D**).

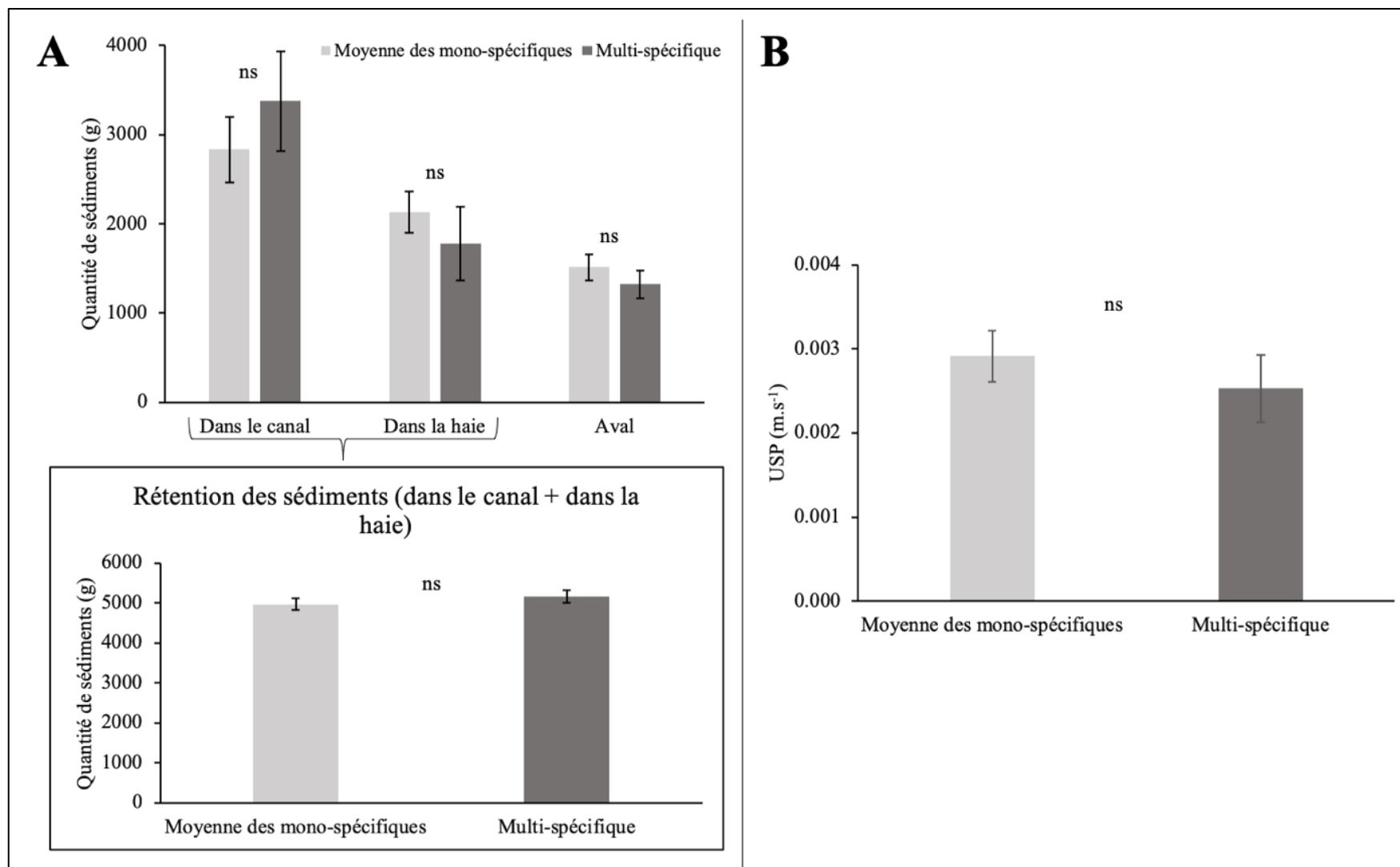


Figure 11. Différences entre la moyenne des communautés mono-spécifiques et multi-spécifiques pour (A) les quantités de sédiments en amont, à l'intérieur et en aval de la haie herbacée, ainsi que la rétention des sédiments (dans le canal + dans la haie) et (B) l'USP au débit $4 \text{ L.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$. Les barres représentent les valeurs moyennes \pm erreur standard.

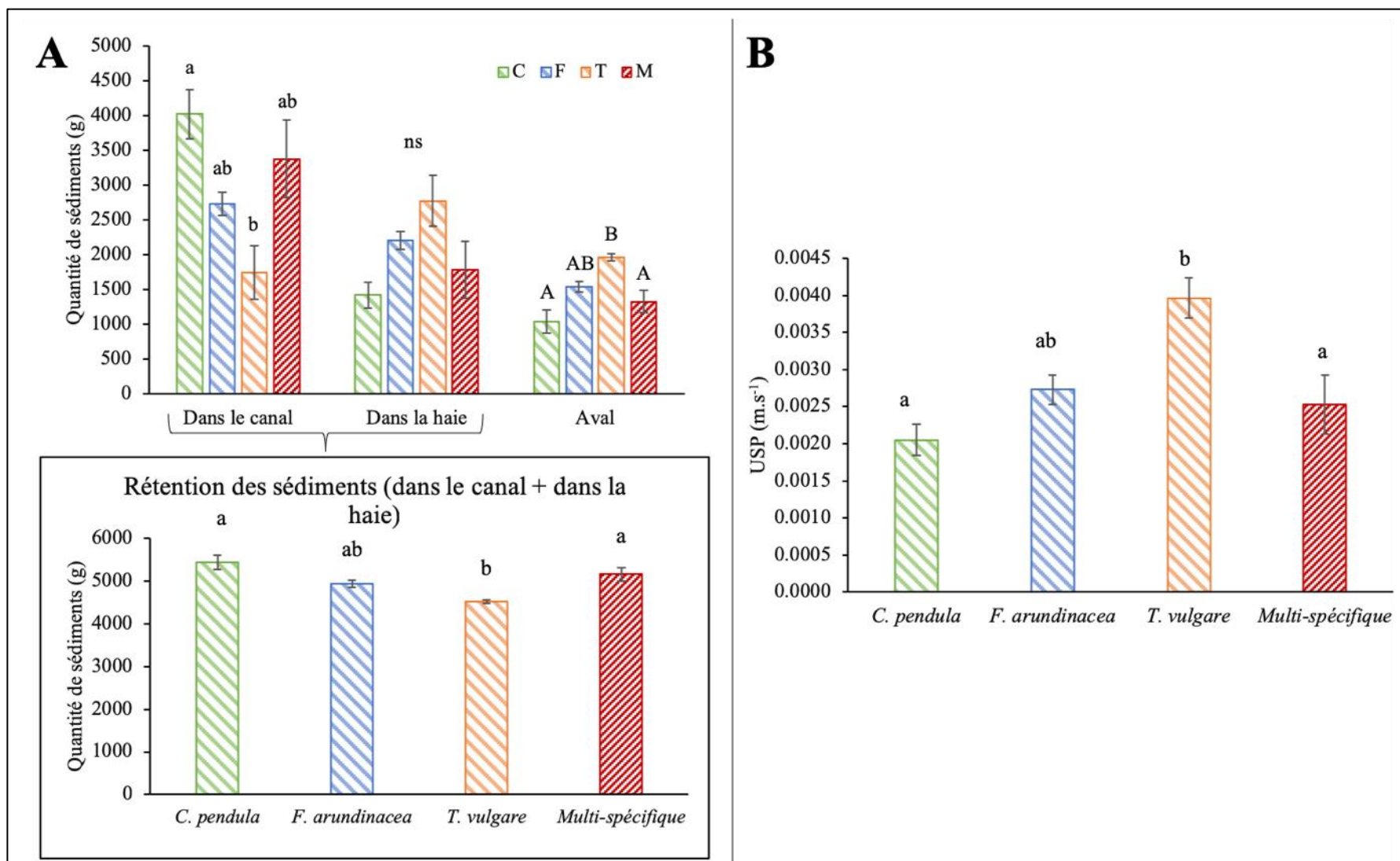


Figure 12. Différences entre chaque condition pour (A) les quantités de sédiments en amont, à l'intérieur et en aval de la haie herbacée, ainsi que la rétention des sédiments et (B) l'USP au débit 4 L.s⁻¹.m⁻¹. Les barres représentent les valeurs moyennes ± erreur standard.

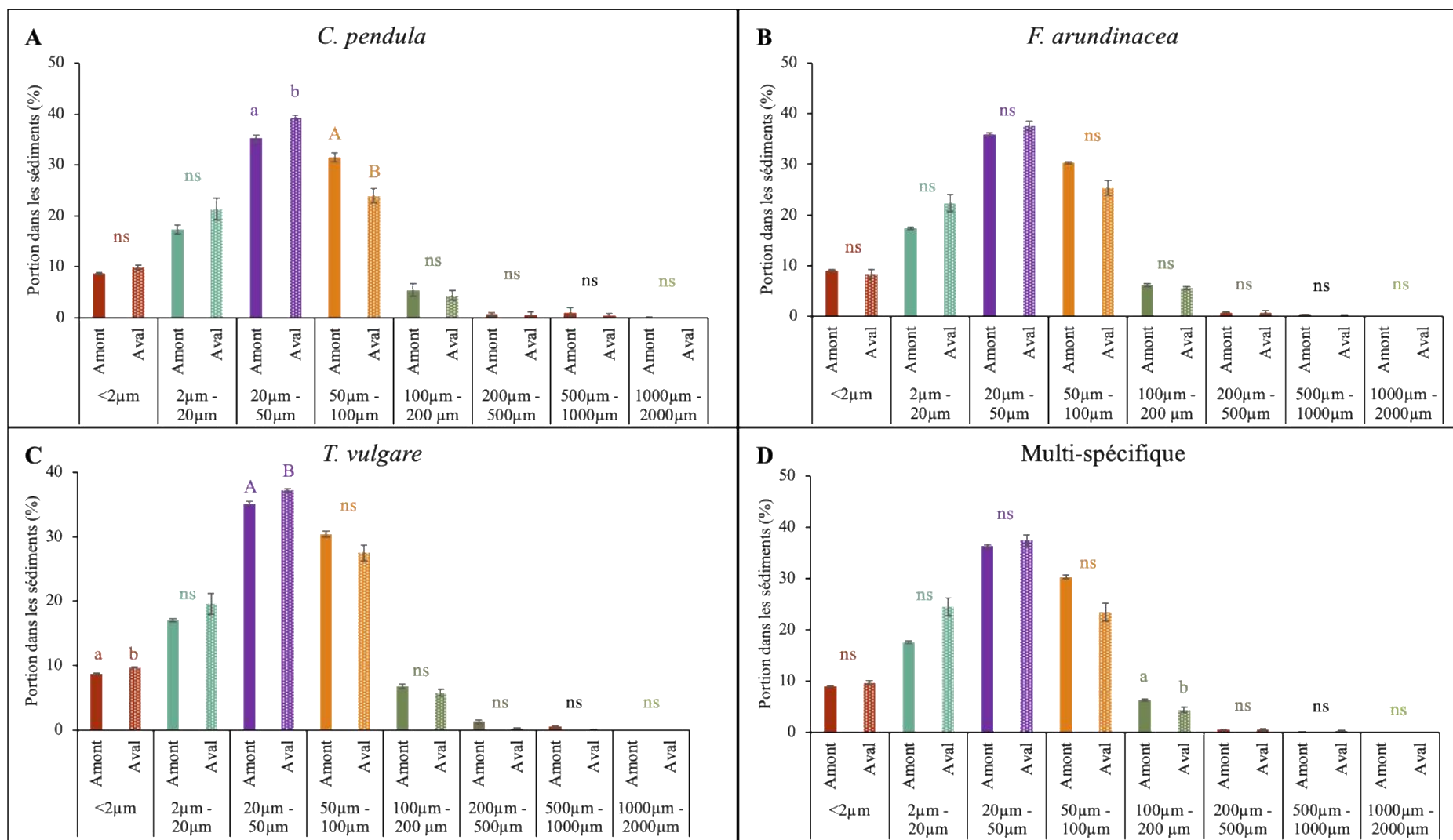


Figure 13. Différences dans les quantités de sédiments en amont et en aval de la haie herbacée pour chaque catégorie de taille de particules pour (A) *C. pendula*; (B) *F. arundinacea*; (C) *T. vulgare* et (D) la communauté multi-spécifique

1.3.3. Implications

Un effet dominant des traits foliaires a été mis en évidence dans l'expérimentation faite *in-situ* fin 2017, montrant l'effet dominant de la densité de feuille et de la surface foliaire de *Tanacetum vulgare* sur la rugosité hydraulique et la rétention des sédiments. Cependant, aucun effet négatif de la diversité fonctionnelle n'a été mis en évidence. En effet, les haies multi-spécifiques ont montré une efficacité égale à celle des haies mono-spécifiques de *Carex pendula* et de *Festuca arundinacea* (plantes trouvées dans les plus efficaces sur les tests en monoculture de l'été 2016). **Ces résultats indiquent donc que l'utilisation de plusieurs espèces pour créer une haie herbacée n'impacterait pas l'efficacité de celle-ci comparé à une haie mono-spécifique.** Une perspective intéressante serait de tester un plus grand nombre de combinaisons, présentant un gradient de nombre d'espèces et d'abondances différentes de chaque espèce, afin (1) d'alimenter les connaissances des effets de la diversité fonctionnelle sur la rugosité hydraulique et la rétention des sédiments et (2) d'offrir un plus grand panel de propositions de designs de haies herbacées.

La multi-spécificité de la haie herbacée procurerait aussi des effets supplémentaires sur un contexte plus large. En effet, intégrer un mélange d'espèces dans la haie permettrait, entre autres, la pérennité de la haie herbacée face aux activités agricoles adjacentes (par exemple, le mélange d'espèces monocotylédones et dicotylédones permettrait la pérennité de la haie en cas de dérive d'herbicides ciblant un type précis de plantes), la création de nouveaux habitats pour la faune indigène du territoire, restaurerait la connectivité écologique du paysage.

Enfin, la combinaison d'une haie herbacée avec une haie arbustive en **aval** (avec un positionnement nord-sud de la ligne d'arbustes afin de limiter la compétition pour la lumière) permettrait différents services, tels que (1) la protection physique de la haie herbacée contre les engins et traitements agricoles (rampe de pulvérisateur avec herbicide) et (2) la maximisation de l'efficacité du contrôle de l'érosion et du ruissellement, avec une rugosité hydraulique élevée créée par la haie herbacée qui permet de favoriser l'infiltration des écoulements par la haie arbustive du fait de son réseau racinaire plus développé et prompt à l'infiltration.

2. Diffusion de la technique de l'approche fonctionnelle appliquée aux haies herbacées et au contrôle du ruissellement et de l'érosion

Au cours des trois ans de doctorat, 4 articles et 5 présentations orales et posters ont été faites, au niveau national et international.

2.1. Liste des publications :

2.1.1. Articles publiés dans des journaux internationaux à comité de lecture

Un article dit « standard », portant sur les résultats de la première partie des expérimentations de 2016 (**voir paragraphe 1.1** du présent document), a été publié dans le journal Ecological Engineering en Avril 2018 :

Kervroëdan, L., Armand, R., Saunier, M., Ouvry, J.-F., Faucon, M.-P., 2018. Plant functional trait effects on runoff to design herbaceous hedges for soil erosion control. Ecol. Eng. 118, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.024>.

2.1.2. Articles soumis dans des journaux internationaux à comité de lecture

Un article dit « standard », portant sur les résultats de la deuxième partie des expérimentations de 2016 (**voir paragraphe 1.2** du présent document), a été soumis dans le journal Ecohydrology et est présentement en révision :

Kervroëdan, L., Armand, R., Saunier, M., Faucon, M.-P.. Functional diversity effects of herbaceous vegetation on runoff to design herbaceous hedges for sediment retention. Ecohydrology.

Un article dit « review » a été soumis dans le journal Agronomy for sustainable development et est présentement en révision :

Kervroëdan, L., Armand, R., Rey, F., Faucon, M.-P.. Plant functional traits effects of herbaceous vegetation on runoff mitigation, sediment retention and soil erosion control in agricultural landscapes under temperate climates. A review. Agronomy for sustainable development.

2.1.3. Manuscrits en préparation pour soumission dans des journaux internationaux à comité de lecture

Un manuscrit, portant sur les expérimentations de 2017 (**voir paragraphe 1.3** du présent document), est en cours de finalisation pour une soumission dans le journal Plant and Soil.

2.2. Communications posters dans des congrès nationaux et internationaux

Une présentation poster a été faite en Avril 2017 lors du congrès EGU (European Geosciences Union) à Vienne (Autriche) sur les résultats obtenus pendant les expérimentations de 2016 (**voir paragraphes 1.1 et 1.2** du présent document) :

Kervroëdan, L., Armand, R., Saunier, M., Faucon, M.-P., 2017. Understanding soil erosion processes within herbaceous vegetation using plant functional traits approach in North-West Europe. European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2017, 23/04/2017 – 28/04/2017, Vienna, Austria.

2.3. Communications orales dans des congrès nationaux et internationaux

Une présentation orale a été faite sur les résultats de la première partie des expérimentations de 2016 (**voir paragraphe 1.1** du présent document) au congrès ECOSUMMIT à Montpellier (France) en Septembre 2016 :

Kervroëdan, L., Armand, R., Saunier, M., Ouvry, J.-F., Faucon, M.-P., 2016. Plant functional traits approach on hydraulic brake and soil erosion in north-western Europe. ECOSUMMIT 2016, 29/08/2016 – 02/09/2016, Montpellier, France.

Une présentation orale a été faite sur les résultats de la première partie des expérimentations de 2016 (**voir paragraphe 1.1** du présent document) aux Journées Jeunes Chercheurs Condorcet à Amiens (France) en Janvier 2017 :

Kervroëdan, L., Armand, R., Saunier, M., Ouvry, J.-F., Faucon, M.-P., 2017. Effects of aboveground plant functional traits on hydraulic roughness, implication in soil erosion reduction. Journées des Jeunes Chercheurs Condorcet 2017, 19/01/2017 – 20/01/2017, Amiens, France.

Une présentation orale a été faite sur les résultats de la deuxième partie des expérimentations de 2016 (**voir paragraphe 1.2** du présent document) au congrès British Ecological Society (BES) Annual Meeting à Gand (Belgique) en Décembre 2017 :

Kervroëdan, L., Armand, R., Saunier, M., Faucon, M.-P., 2017. Understanding functional diversity effects of aboveground functional traits on runoff in herbaceous vegetation. British Ecological Society (BES) Annual Meeting 2017, 11/12/2017 – 14/12/2017, Ghent, Belgium.

Une présentation orale a été faite sur les résultats de la deuxième partie des expérimentations de 2016 et les résultats des expérimentations de 2017 (**voir paragraphes 1.2 et 1.3** du présent document) aux Journées d'Études des Sols à Rouen (France) en Juillet 2018 :

Kervroëdan, L., Armand, R., Saunier, M., Faucon, M.-P., 2018. Effet de la diversité fonctionnelle des haies herbacées sur l'érosion. Journées d'études des sols (JES) 2018, Rouen, France.

2.4. Communications orales lors de journées thématiques

Une présentation orale a été faite lors de la journée thématique « Ruissellement et érosion des sols – Impacts, outils et aides financières » de l'Union Régionale des Centres Permanents d'Initiatives pour l'Environnement (URCPIE) de Picardie en Juillet 2017 à Beauvais (France).

Une présentation orale a été faite à la journée thématique « Préservation de la qualité physique des sols et présentation du SOERE – INRA », dans le cadre des « Journées thématiques Sol », en Novembre 2017 à Estrées-Mons (France).