
Infrastructures vertes et services écosystémiques : L'influence du substrat et de la végétation sur le service de régulation des flux hydriques rendu par les toitures vertes

Auteur : Doncel, Alexis

Promoteur(s) : Mahy, Grégory; Rivière, Lucie

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/13231>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

INFRASTRUCTURES VERTES ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES : L'INFLUENCE DU SUBSTRAT ET DE LA VÉGÉTATION SUR LE SERVICE DE RÉGULATION DES FLUX HYDRIQUES RENDU PAR LES TOITURES VERTES

ALEXIS DONCEL

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS

ANNÉE ACADÉMIQUE 2020-2021

(CO)-PROMOTEUR(S): MAHY GRÉGORY & RIVIÈRE LUCIE

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

INFRASTRUCTURES VERTES ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES : L'INFLUENCE DU SUBSTRAT ET DE LA VÉGÉTATION SUR LE SERVICE DE RÉGULATION DES FLUX HYDRIQUES RENDU PAR LES TOITURES VERTES

ALEXIS DONCEL

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS

ANNÉE ACADÉMIQUE 2020-2021

(CO)-PROMOTEUR(S): MAHY GRÉGORY & RIVIÈRE LUCIE

Remerciements

Je tiens à remercier mon co-promoteur, Pr. Grégory Mahy pour son encadrement, sa disponibilité, son intérêt porté à mon travail et ses conseils nombreux et très utiles dont j'ai pu profiter durant l'intégralité de ce travail.

Je remercie également ma co-promotrice, Lucie Rivière, sans qui le rendu final de ce travail n'aurait pas été le même. Merci à elle pour ce quadrimestre passé en sa compagnie, pour sa réactivité, son enthousiasme, son soutien permanent et son dynamisme.

Merci à Lucas Contino pour ses conseils très utiles et son aide manuelle tout le long de ce travail, ainsi que pour son aide extrêmement précieuse au cours du montage du dispositif.

Merci également à tous les membres de ma famille ainsi qu'à mes proches. Et merci particulièrement à mes parents, mes deux grand-mères et mon arrière-grand-mère qui m'ont soutenu durant toute ma vie d'étudiant et ont contribué à l'aboutissement de ces cinq années d'étude.

Enfin, merci à l'ensemble de l'équipe Biodiversité et Paysage pour leur accueil, leur convivialité et leur aide durant le montage du dispositif ainsi que tout au long de ce travail.

Résumé

Parmi les services écosystémiques rendus par les toitures vertes, la régulation des flux hydriques fait partie des plus importants. C'est via son habilité à retenir l'eau (rétention) ou à freiner son débit (détention) que la toiture verte fournit ce service.

Ce travail vise, d'une part, à identifier la manière dont la structure de l'écosystème de toiture verte (caractérisée par son substrat et sa végétation) influence sa capacité de rétention. Une expérimentation au cours de laquelle des échantillons de toitures vertes ont été assemblés dans des bacs de 1 m² a permis d'observer une contribution plus importante à cette capacité de rétention de la part d'un substrat fait de matériau recyclé par rapport à un substrat trouvé dans le commerce (substrat Zinco). Cette expérimentation a également mis en évidence le rôle important du couvert végétal ainsi que, dans une moindre mesure, de la hauteur de la végétation, à condition que celle-ci soit couplée à un couvert également important, dans la capacité de rétention du système.

D'autre part, ce travail vise à identifier la manière dont cette même structure de l'écosystème de toiture verte impacte la capacité de détention de la toiture. Une averse d'intensité modérée précédée par des conditions météorologiques humides a été suivie afin d'analyser l'évolution du débit d'écoulement lié à cette averse à travers les bacs. Sous ces conditions, le substrat Zinco est le plus intéressant. La végétation apporte également une plus-value à cette capacité de détention de manière générale, cette plus-value étant plus intéressante dans le substrat Zinco. Sous ces mêmes conditions, le couvert végétal a une influence sur le délai entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations dans le substrat Zinco.

Les résultats de ce travail apportent des connaissances supplémentaires concernant l'interaction entre la structure de l'écosystème de toitures vertes et le service de régulation des flux hydriques fourni par ce dernier, et donne des pistes concernant la végétation et le substrat à privilégier en vue d'optimiser ce service écosystémique.

Mots clés : toiture verte, service écosystémique, flux hydrique, rétention d'eau, détention d'eau.

Abstract

Among the ecosystem services provided by green roofs, the regulation of water flows is one of the most important. It is through its ability to retain water (retention) or to slow down its flow (detention) that the green roof provides this service.

This work aims, on the one hand, to identify how the structure of the green roof ecosystem (characterized by its substrate and vegetation) influences its retention capacity. An experiment in which green roof samples were assembled in 1 m² containers allowed us to observe a greater overall contribution to this retention capacity from a substrate made of recycled material compared to a commercially available substrate (Zinco). This experimentation also highlighted the important role of the vegetation cover and, to a lesser extent, the height of the vegetation, provided that it is coupled with an important cover, in the retention capacity of the system.

On the other hand, this work aims to identify how this same green roof ecosystem structure impacts the roof's detention capacity. A moderate intensity rainfall event preceded by wet weather conditions was monitored in order to track the flow rate associated with this rainfall event through the containers. Under these conditions, the Zinco substrate is the most interesting. The vegetation also adds value to this holding capacity in general, with the Zinco substrate providing the most value. Under the same conditions, the vegetation cover has an influence on the delay between peak flow and peak rainfall in the Zinco substrate.

The results of this work provide additional knowledge about the interaction between the structure of the green roof ecosystem and the water flow regulation service provided by the latter and give clues about the vegetation and the substrate to be preferred in order to optimize this ecosystem service.

Key words: green roof, ecosystem services, water flux, water retention, water detention.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
1 Introduction	1
2 État de l'art.....	2
2.1 L'hydrologie en milieu urbain	2
2.2 Les toitures vertes	2
2.2.1 Généralités	2
2.2.2 Intérêt des toitures vertes et notion de service écosystémique.....	3
2.2.3 Substrat caractéristique	4
2.2.4 Végétation caractéristique	4
2.3 Fonctions de l'écosystème de toitures vertes.....	5
2.3.1 Rétention d'eau	5
2.3.2 Détention d'eau.....	5
2.4 Processus écosystémiques	6
2.4.1 L'interception	6
2.4.2 L'évapotranspiration	7
2.5 Structure de l'écosystème.....	8
2.5.1 Substrat	8
2.5.2 Végétation et traits fonctionnels.....	9
2.6 Variables météorologiques	11
2.7 Résumé global	11
3 Question de recherche.....	12
4 Matériels et méthodes.....	13
4.1 Site de l'expérimentation	13
4.2 Description du dispositif expérimental	13
4.3 Collecte des données.....	16
4.3.1 Collecte des données liées à la rétention d'eau.....	16
4.3.2 Collecte des données liées à la détention d'eau	16
4.3.3 Mesure de la teneur en eau volumétrique des substrats	17
4.3.4 Mesure des traits fonctionnels et du couvert	18
4.4 Analyse des données	21
4.4.1 Rétention d'eau	21
4.4.2 Détention d'eau.....	22

5	Résultats.....	23
5.1	Rétention.....	23
5.1.1	Taux de rétention mensuel et comparaison des substrats	23
5.1.2	Influence de la végétation sur la capacité de rétention des bacs	29
5.1.3	Effet des traits fonctionnels et du couvert sur le taux de rétention - Mai.....	29
5.1.4	Effet des traits fonctionnels et du couvert sur le taux de rétention - Juin.....	31
5.1.5	Effets individuels des variables les plus significatives	34
5.2	Détention.....	37
5.2.1	Comparaison des deux substrats.....	37
5.2.2	Effet de la végétation sur le taux d'atténuation du pic d'écoulement	38
5.2.3	Effet de la végétation sur le délai entre le pic de débit d'écoulement et le pic de précipitations.....	39
6	Discussion.....	40
6.1	Capacité de rétention.....	40
6.1.1	Influence des précipitations et de la teneur en eau du substrat sur la capacité de rétention des bacs	40
6.1.2	Comparaison des substrats	41
6.1.3	Influence de la végétation sur la capacité de rétention des bacs	42
6.2	Capacité de détention	44
6.2.1	Comparaison des substrats	44
6.2.2	Influence de la végétation sur la capacité de rétention des bacs	44
7	Conclusion générale.....	45
8	Bibliographie	46
9	Annexes.....	52

1 Introduction

Depuis environ 1950, la population urbaine ne cesse d'augmenter, si bien que d'ici la moitié du siècle, celle-ci pourrait représenter 68 % de la population mondiale (United Nations, 2019). Par conséquent, l'expansion des zones urbaines au sein de la surface terrestre est en constante progression, ce qui a pour conséquence une forte altération de la structure du paysage et une baisse localement des performances environnementales (Pauleit et al., 2005). Ces moindres performances environnementales se traduisent entre autres par une hausse des températures locales (Q. Li et al., 2004), un déclin de la richesse spécifique (McKinney, 2002), la disparition d'espèces natives au profit d'espèces exotiques adaptées aux milieux urbains (McKinney, 2002, 2006), une mauvaise qualité de l'air (Hoek et al., 2002), ou encore une perturbation des cycles hydrologiques (Arnold & Gibbons, 1996; Barnes et al., 2002). De plus, le bien-être des citoyens peut également être amoindri en raison d'un accès limité aux espaces naturels et/ou de loisirs (Hofmann et al., 2012).

De cette situation émergent donc de nombreux enjeux. Il est aujourd'hui impératif d'aménager les villes de demain de façon à atténuer leur impact environnemental. Dans cette optique, le concept d'infrastructure verte a émergé. Une infrastructure verte au sens large peut être définie comme étant « l'ensemble des réseaux naturels, semi-naturels et artificiels de systèmes écologiques multifonctionnels dans, autour et entre les zones urbaines » (Tzoulas et al., 2007). Parmi les différents types d'éléments d'infrastructure verte existants, nous pouvons citer entre autres les murs verts, les parcs, ou encore les toitures vertes. Du fait des nombreux services écosystémiques fournis par les infrastructures vertes, l'aménagement de celles-ci au sein des villes améliorerait les conditions environnementales dans les villes et établirait un réseau écologique au sein même de ces milieux souvent hostiles au développement de la nature (S. . Gill et al., 2007; Schäffler & Swilling, 2013; Tzoulas et al., 2007; H. Wright, 2011).

Ce présent travail s'est penché sur la problématique des toitures vertes et de leur influence sur les cycles hydrologiques. L'objectif du travail est d'identifier quelle structure de l'écosystème instauré au sein des toitures vertes optimiserait, de par sa végétation (morphologie, occupation de l'espace etc.) et le substrat sur lequel il repose, le service de régulation des flux hydriques rendus par celui-ci.

2 État de l'art

2.1 L'hydrologie en milieux urbains

Les milieux urbains engendrent de très grandes étendues de surface imperméable. Par conséquent, l'infiltration des eaux de pluies dans le sol est réduite dans ces zones, tandis que l'écoulement superficiel de celles-ci est accru (Arnold & Gibbons, 1996; Barnes et al., 2002). Le développement des villes a donc jusqu'à maintenant été accompagné par l'aménagement de systèmes d'évacuation des eaux en dehors de celles-ci. Généralement, ces systèmes permettent à la fois d'évacuer les eaux de pluies et les eaux usées non traitées. Cependant, lors d'averses trop intenses, ceux-ci peuvent rapidement saturer, induisant ainsi des inondations (Perry & Nawaz, 2008; Vesuviano & Stovin, 2013). De plus, une partie des eaux usées non traitées peut également être entraînée par ces inondations vers les cours d'eaux, les lacs ou la mer plutôt que vers des stations de traitement des eaux, ce qui peut avoir pour conséquence une accumulation d'éléments toxiques dans les écosystèmes liés aux eaux de surfaces (Buccola & Spolek, 2011; Vesuviano & Stovin, 2013).

Étant donné qu'une augmentation de la capacité de l'ensemble des systèmes d'évacuation des eaux serait extrêmement coûteuse (Nagase & Dunnett, 2012), de nouvelles pratiques ont été imaginées pour une meilleure gestion des eaux au sein des villes (Carter & Jackson, 2007). Ces pratiques, appelées BMP (Best Management Practice), ont pour objectif de stocker une plus grande quantité d'eau de pluie au sein des écosystèmes urbains, et de ralentir le débit d'écoulement de celles-ci vers les eaux de surface. Parmi les BMP existantes, citons entre autre les toitures vertes.

2.2 Les toitures vertes

2.2.1 Généralités

Bien que le concept de toiture verte ne se soit popularisé que depuis récemment au cours de l'époque contemporaine, l'idée de transformer les toits des bâtiments en jardins suspendus existe depuis plusieurs siècles. Les plus anciennes traces documentées de ce type d'infrastructure datent d'environ 500 Avant Jésus-Christ et ne sont nulle autre que les Jardins Suspendus de Babylone (Getter et al., 2007; Oberndorfer et al., 2007). La version moderne des toitures végétalisées, c'est à dire les toitures dont la couche superficielle est composée d'un substrat couvert de végétation (Berardi et al., 2014; Mickovski et al., 2013), semble toutefois avoir émergé en Allemagne durant le 20^e siècle (Oberndorfer et al., 2007).

Il existe deux grands types de toitures vertes. D'une part, les toitures vertes intensives, nommées ainsi en raison de l'entretien constant qu'elles nécessitent, sont caractérisées par une couche de substrat relativement profonde au sein de laquelle peuvent pousser des arbres ou des buissons. D'autre part, les toitures vertes extensives, caractérisées par une couche de substrat plus fine (généralement moins de 15 cm), et donc par une végétation limitée à des espèces herbacées, ne demandent quant à elles que peu d'entretien et sont plus légères, ce qui les rend plus largement répandues en raison de leur plus grande facilité d'installation (Czemiel Berndtsson, 2010; Getter & Rowe, 2006). Dans le cadre de ce travail, ce sont les toitures vertes extensives qui seront étudiées.

La configuration typique des toitures vertes est la suivante : sous la couche de substrat se trouve une couche filtrante faite de textile empêchant les particules fines d'être entraînées par les eaux. Ce filtre textile repose sur une couche drainante permettant l'écoulement de l'eau excédentaire hors de la toiture (Figure 1). Aussi, une couche de protection contre les racines entre la toiture verte et la toiture de base doit être installée et imperméabilisée (Czemieli Berndtsson, 2010; Getter & Rowe, 2006; Nawaz et al., 2015).

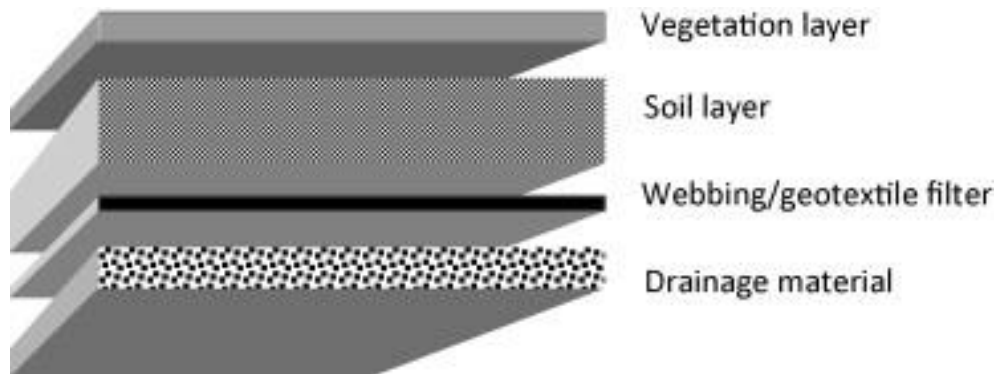


Figure 1 : Représentation schématique des différentes couches caractérisant une toiture verte (Czemieli Berndtsson, 2010).

2.2.2 Intérêt des toitures vertes et notion de service écosystémique

Comme mentionné précédemment, l'utilité des toitures vertes réside dans le fait que celles-ci ont la capacité d'améliorer les performances environnementales des villes, et donc d'améliorer la qualité de vie des citoyens. Cette aptitude à contribuer au bien-être des Humains est fortement liée à la notion de service écosystémique.

Les services écosystémiques peuvent être définis comme étant « les conditions et les processus à travers lesquels les écosystèmes naturels, et les espèces qui les composent, soutiennent et supportent la vie humaine » (Daily, 1997). En d'autres termes, les écosystèmes naturels sont capables de fournir à l'Homme des services pouvant contribuer à son bien-être (santé, sécurité etc.) (Potschin & Haines-Young, 2011). Cette notion de service écosystémique donne donc tout son sens à l'idée de vouloir « recréer la nature » à l'intérieur des villes afin d'améliorer les conditions environnementales au sein et dans le périmètre de celles-ci.

L'un des principaux services écosystémiques rendus par les toitures vertes est la régulation des flux hydriques, en partie grâce à la végétation et au substrat tous les deux capables de contribuer à la rétention des eaux de pluies ainsi que d'influencer la dynamique d'écoulement de celles-ci (Czemieli Berndtsson, 2010). En effet, les pores ainsi que les matériaux présents dans le substrat peuvent retenir l'eau de pluie avant qu'une partie de celle-ci soit prélevée par les plantes ou évaporée (Nagase & Dunnett, 2012). De plus, les plantes et le substrat forment également une barrière physique pouvant ralentir l'écoulement des eaux de pluies (Brandão et al., 2017).

Les toitures vertes contribuent également à la réduction de la température de l'air et des bâtiments (Eumorfopoulou & Aravantinos, 1998; Getter & Rowe, 2006; D. Li et al., 2014; Oberndorfer et al., 2007). En effet, l'absorption du rayonnement solaire par la plante nécessaire à la photosynthèse, les propriétés réfléchissantes des plantes, la capacité thermique élevée du substrat, ou encore les nombreux processus d'évaporation prenant place

au sein de l'écosystème de toiture verte contribuent à limiter les influx de chaleur au sein de l'écosystème urbain (Berardi et al., 2014; Eumorfopoulou & Aravantinos, 1998).

L'utilisation de toitures vertes se justifie également par leur aptitude à réduire la pollution de l'air environnant. Par exemple, dans la ville de Chicago, 1 hectare de toiture verte est capable d'extraire de l'atmosphère en moyenne 85 Kg par an de particules polluantes telles que l'ozone (O₃), le dioxyde de soufre (SO₂), ou encore le dioxyde d'azote (NO₂) (Yang et al., 2008). Les toitures végétalisées ont aussi la capacité de réduire la concentration en CO₂ de l'air (J. Li et al., 2010; Moghbel & Erfanian Salim, 2017).

Enfin, les toitures vertes peuvent servir d'habitat pour de nombreuses espèces biologiques (Francis & Lorimer, 2011), dont des espèces menacées d'extinction (Brenneisen, 2003; Madre et al., 2014). Par conséquent, l'ensemble des toitures végétalisées et des autres types d'infrastructures vertes constituent un véritable réseau écologique au sein de la ville (Tzoulas et al., 2007).

2.2.3 Substrat caractéristique

Le type de substrat est un élément extrêmement déterminant lors de la mise en place d'une toiture verte. En effet, de par sa texture, sa porosité et sa profondeur, celui-ci influencera directement la quantité d'eau pouvant être retenue par le système (Czemieli Berndtsson, 2010; Nimmo, 1997). De plus, le substrat utilisé influencera le cortège d'espèces végétales pouvant se développer au sein de la toiture étant donné c'est lui qui déterminera la quantité d'eau, de nutriments et d'oxygène pouvant être prélevés par les plantes (Bates et al., 2015; Emilsson, 2008).

Afin d'éviter l'apparition de pourriture causée par la stagnation des eaux au sein du substrat, celui-ci doit pouvoir être facilement drainé. Pour cette raison, les substrats utilisés lors de la mise en place de ce type de toiture sont composés majoritairement de matériau grossier (Stovin et al., 2015). C'est également l'une des raisons qui explique la faible profondeur du substrat caractérisant les toitures vertes extensives.

Pour recréer ce type de texture, des agrégats recyclés issus de briques et de débris de bâtiments peuvent être utilisés comme matériau grossier. Ces éléments sont appréciés en raison de leur coût peu élevé ainsi que de leur faible impact environnemental (Emilsson, 2008).

2.2.4 Végétation caractéristique

En raison de la faible profondeur et de la texture relativement grossière du substrat, la végétation présente au sein des toitures vertes doit pouvoir tolérer les stress hydriques. Pour cette raison, les plantes capables d'adopter une stratégie de type CAM (Crassulacean Acid Metabolism) sont souvent considérées comme les mieux adaptées aux conditions de vie des toitures vertes (Nagase & Dunnett, 2012). Le problème des plantes CAM est qu'elles optimisent très peu le service de régulation des flux hydriques. Par exemple, les espèces du genre *Sedum*, très largement utilisées dans les toitures vertes, n'offrent pas une bonne capacité de rétention d'eau au système étant donné que ce type de plante ne prélève que peu d'eau dans le substrat (Nagase & Dunnett, 2012).

Individuellement, les graminées et les dicotylédones herbacées contribuent mieux au service de régulation des flux hydriques que les plantes CAM (J. Lundholm et al., 2010). Ainsi, il est important de pouvoir identifier quelles espèces de graminées et de dicotylédones sont adaptées aux conditions abiotiques imposées par les toitures vertes tout en apportant une plus-value au service de régulation des flux hydriques rendu par la toiture.

Une façon de caractériser la végétation pouvant tolérer les conditions abiotiques imposées par les toitures vertes serait de considérer ces dernières comme étant des habitats analogues à d'autres habitats naturels (J. T. Lundholm & Richardson, 2010). En effet, les conditions abiotiques créées artificiellement au sein des toitures végétalisées ressemblent à celles observées dans d'autres écosystèmes naturels tels que les pelouses calcaires, les talus d'éboulis, les plateaux calcaires (Van Mechelen et al., 2014), voire les friches industrielles (Bates et al., 2015). En raison de ces similitudes, il peut donc être intéressant de s'inspirer du cortège végétal présent dans ces écosystèmes naturels lors du choix des espèces à intégrer dans un écosystème de toiture verte.

2.3 Fonctions de l'écosystème de toitures vertes

La fonction d'un écosystème correspond aux « propriétés de celui-ci pouvant potentiellement être bénéfiques pour l'Homme » (Costanza et al., 1997; Potschin & Haines-Young, 2011). Un service écosystémique dérive toujours d'une ou de plusieurs fonctions de l'écosystème. Par conséquent l'évaluation de la qualité de ce service passe toujours par l'identification et la quantification des fonctions de l'écosystème liées à ce service.

Dans le cadre de l'évaluation du service de régulation des flux hydriques fourni par les toitures vertes, deux fonctions ont été identifiées : la capacité de rétention, ainsi que la capacité de détention de l'eau de pluie par la toiture.

2.3.1 Rétention d'eau

La capacité de rétention d'eau d'une toiture verte correspond à sa faculté de retenir l'eau de pluie sans que cette dernière ne quitte le système par écoulement (Stovin et al., 2015). Cela se produit via l'interception des précipitations par la végétation (Levia & Frost, 2006) ou via le stockage de l'eau directement dans les pores du substrat (Nagase & Dunnett, 2012). Cette eau retenue finira alors par s'évaporer ou par être absorbée par les racines de la plante (Czemiel Berndtsson, 2010).

2.3.2 Détention d'eau

La capacité de détention d'eau d'un système peut-être définie comme étant son habilité à ralentir la dynamique d'écoulement de l'eau de pluie à travers celui-ci (Stovin et al., 2015; Villarreal, 2007).

Il existe plusieurs façons de quantifier la capacité de détention d'eau d'un système. Entre autres, il est possible de mesurer le délais entre le moment où le pic de débit d'écoulement à travers le système est atteint et le moment du pic d'intensité des précipitations (Figure 2).

La capacité de rétention peut également se quantifier via le calcul du taux d'atténuation du pic d'écoulement. Ce taux correspond à la différence, exprimée en %, entre l'intensité des précipitations au moment du pic et le débit d'écoulement au moment du pic (Figure 2).

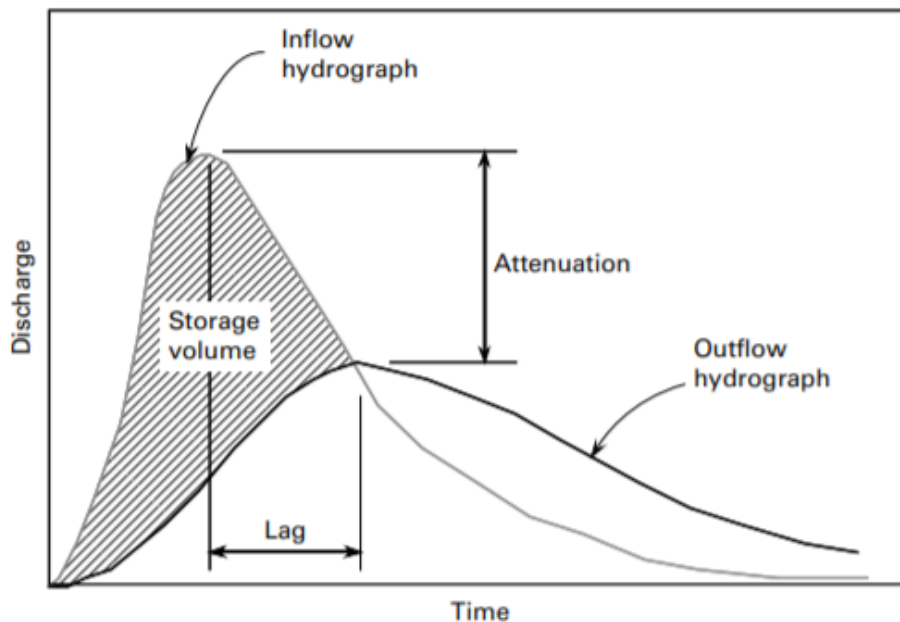


Figure 2 : Représentation de la différence entre un hydrographe d'entrée (précipitations) et un hydrographe de sortie (écoulement) dans un système de toiture verte extensive suite à l'effet de rétention d'eau (Villarreal, 2007). L'atténuation du pic d'écoulement ainsi que le délai (lag) entre le pic de précipitations et le pic d'écoulement sont mis en évidence dans ce graphique.

2.4 Processus écosystémiques

Les différents individus composant un écosystème peuvent interagir entre eux ou avec l'environnement afin de réaliser différents processus biophysiques. Les fonctions de l'écosystème sont régies par ces processus.

Les deux principaux processus impactant la rétention et la détention d'eau dans l'écosystème de toiture verte sont l'évapotranspiration et l'interception des précipitations par la végétation.

2.4.1 L'interception

On parle d'interception des précipitations par la végétation lorsque cette dernière forme une barrière physique à l'encontre de la pluie (Figure 3).

On parle d'abord d'interception directe lorsque les organes aériens de la végétation retiennent l'eau précipitée et que cette dernière finit par s'évaporer avant d'atteindre le sol (Crockford & Richardson, 2000; Inkiläinen et al., 2013; Levia & Frost, 2006; Park & Cameron, 2008). Étant donné que les organes aériens des plantes ne peuvent pas retenir une quantité illimitée d'eau, une partie de l'eau interceptée par la végétation finit tout de même par s'écouler jusqu'au sol (Levia & Frost, 2006; Pypker et al., 2005).

Lorsque l'eau interceptée parvient à atteindre le sol, elle le fait soit sous forme de pluviolessivats, soit en ruisselant le long des tiges (Crockford & Richardson, 2000; Inkiläinen et

al., 2013; Levia & Frost, 2006; Park & Cameron, 2008). Dans ce cas-ci, la végétation permet malgré tout à l'eau d'atteindre le sol de manière plus graduelle et donc de minimiser le débit d'écoulement à travers le système. Ainsi, lorsque la végétation n'est plus capable de retenir l'eau de pluie, elle contribue tout de même à la détention de celle-ci (Chappell et al., 2001; David et al., 2005, cités par Inkiläinen et al., 2013).

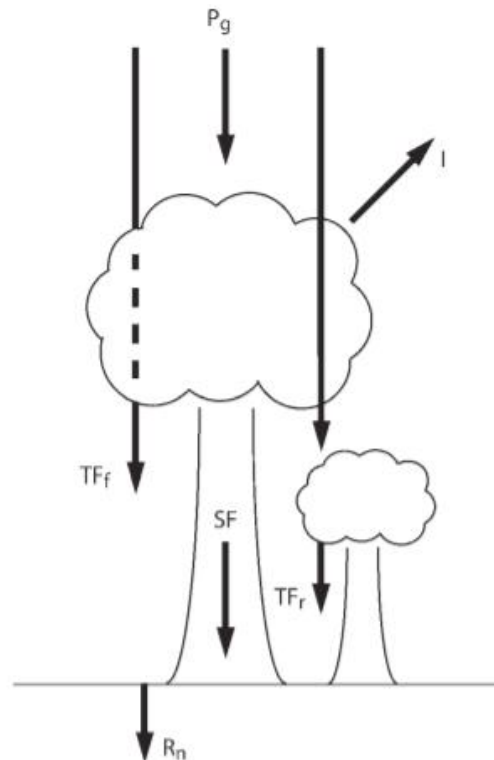


Figure 3 : Représentation schématique des trois composantes de l'interception. P_g correspond à la pluie brute, I l'interception directe, TF les pluiolessivats, SF l'écoulement le long de la tige et R_n la pluie nette atteignant le sol. (Levia & Frost, 2006).

2.4.2 L'évapotranspiration

L'évapotranspiration est la combinaison des processus impliquant le transfert d'eau liquide vers l'atmosphère. Cela concerne l'évaporation de l'eau retenue par le sol et la transpiration de l'eau par les plantes (Labeledzki et al., 2011).

Une plante transpirant beaucoup doit prélever une plus grande quantité d'eau dans le sol afin de compenser les pertes occasionnées. Par conséquent, elle évacue plus rapidement le stock d'eau dans le sol (Kasmin et al., 2010; J. Lundholm et al., 2010; Voyde et al., 2010). Les sols dont l'eau s'évapore rapidement de leurs pores évacuent également ce stock plus rapidement (Stovin et al., 2013). Dans les deux cas, cela permettra au substrat de retenir plus d'eau dans ses pores lors du prochain épisode de précipitations avant que sa capacité au champ¹ ne soit atteinte.

¹ La capacité au champ correspond à la quantité d'eau maximale pouvant être retenue par un sol sans que cette dernière ne soit soumise à l'écoulement gravitaire. Elle détermine ainsi la quantité d'eau maximale disponible pour les plantes et pouvant être évaporée (Nachabe, 1998).

Ainsi, le taux d'évapotranspiration observé dans l'écosystème peut influencer sa capacité de rétention, ainsi que sa capacité à retarder l'écoulement de l'eau à travers celui-ci.

2.5 Structure de l'écosystème

La structure de l'écosystème correspond à l'ensemble des caractéristiques physiques et morphologiques des composantes de celui-ci et à la manière dont ces composantes sont assemblées dans l'espace. La manière dont est structuré un écosystème aura une influence directe sur les processus prenant place au sein de celui-ci et sur les fonctions réalisées par l'écosystème.

2.5.1 Substrat

La quantité d'eau précipitée retenue par le substrat au cours d'un épisode de précipitations dépend fortement des conditions d'humidité observées au sein de celui-ci au départ des précipitations (Moran et al., 2003; Stovin et al., 2013). En effet, lorsque la teneur en eau du substrat est faible, celui-ci est capable de retenir une plus grande quantité d'eau de pluie dans ses pores avant que sa capacité au champ ne soit atteinte. En théorie, l'eau commence à s'écouler à travers le substrat lorsque la capacité au champ du substrat est dépassée. Au contraire, lorsque la teneur en eau du substrat est déjà élevée au départ d'une pluie, peu de place est disponible dans les pores du substrat pour contenir de l'eau supplémentaire. Par conséquent, la capacité au champ sera plus rapidement atteinte, et donc une plus grande quantité d'eau s'écoulera à travers le substrat.

Il en est de même pour ce qui concerne la capacité de détention d'eau du substrat (Stovin et al., 2015). En effet, de nouveau, plus vite la capacité au champ sera atteinte, et plus vite le pic d'écoulement sera atteint à son tour (Villarreal, 2007).

De par sa texture et sa profondeur, la vitesse à laquelle l'eau s'évapore du substrat varie en fonction de celui-ci (B. S. Gill & Jalota, 1996). Nous savons également que le substrat caractéristique des toitures vertes extensives possède une texture majoritairement grossière et est peu profond, ce qui lui permet d'évacuer plus rapidement son stock d'eau. Cependant, un substrat trop grossier risque de laisser s'écouler une trop grande quantité d'eau à travers celui-ci en raison de sa porosité élevée, ce qui causerait un amoindrissement des performances hydriques de la toiture verte (Stovin et al., 2015). Par conséquent, un compromis doit pouvoir être trouvé entre un substrat capable d'évacuer rapidement le stock d'eau au sein de ses pores tout en étant capable de retenir une quantité d'eau élevée au cours des précipitations.

L'enrichissement du substrat utilisé en matière organique pourrait être une solution à ce problème. En effet, dans les substrats à texture majoritairement grossière, l'augmentation de la proportion de matière organique au sein de ceux-ci augmente la capacité au champ du substrat, et donc sa teneur en eau maximale pouvant être atteinte avant que l'eau ne commence à s'écouler à travers celui-ci, ce qui améliore donc sa capacité de rétention (Celik et al., 2004; Edwards et al., 2000; Rawls et al., 2003).

2.5.2 Végétation et traits fonctionnels

Au niveau de la végétation, les valeurs de traits fonctionnels caractérisant les organismes présents dans la toiture peuvent influencer la manière dont celle-ci prendra part aux processus biophysiques de l'écosystème. Un trait fonctionnel peut être défini comme « une composante phénotypique d'un organisme influençant les processus écosystémiques » (Petchey & Gaston, 2006).

Avant d'aller plus loin, il est important d'insister sur le fait que l'objectif de l'écologie fonctionnelle est entre autres d'étudier et de mettre en évidence les relations entre les caractéristiques phénotypiques (morphologiques ou autres) des organismes avec leur environnement plutôt que d'étudier et de comparer l'interaction entre différentes espèces et leur environnement (Dussault, 2019).

Plusieurs traits fonctionnels ainsi que d'autres caractéristiques liées à la végétation pouvant potentiellement avoir une influence sur les processus d'interception et d'évapotranspiration, voire directement sur les fonctions de rétention et de détention d'eau, ont été identifiés. Ceux-ci sont listés ci-dessous.

2.5.2.1 Hauteur

Une corrélation positive existe entre la hauteur de la végétation et la capacité de rétention des toitures vertes (J. Lundholm et al., 2015). La hauteur des individus détermine l'espace occupé par la végétation, et constitue donc un élément caractérisant la barrière végétale interceptant les précipitations (Clark, 1940; Park & Cameron, 2008).

2.5.2.2 Biomasse aérienne

La biomasse aérienne d'un organisme correspond à la masse totale de ses organes aériens.

La biomasse aérienne des individus améliore tant la capacité de rétention du système que sa capacité de détention. En effet, une étude réalisée par J. Lundholm et al. (2010) a montré qu'il existait une corrélation positive entre la biomasse aérienne de la végétation et son taux d'évapotranspiration. Cela est dû au fait qu'une biomasse élevée induit une surface de contact plus grande entre la plante et l'air environnant, et donc une plus grande capacité d'échange via les stomates (Wolf & Lundholm, 2008). De plus, lorsque la biomasse aérienne d'un individu est élevée ou, en d'autres termes, lorsque ses organes aériens sont nombreux et denses, la barrière interceptant les précipitations qu'il constitue gagne encore en efficacité (Domingo et al., 1998).

2.5.2.3 Système racinaire

La manière dont le système racinaire influe sur la régulation des flux hydriques est assez floue. D'une part, un système très développé devrait pouvoir assurer un prélèvement plus important de l'eau dans le sol par la plante, ce qui induirait un renouvellement plus rapide de la capacité de stockage du sol, et donc améliorerait sa capacité de rétention d'eau (Nagase & Dunnett, 2012).

D'autre part, lorsqu'un système racinaire fibreux devient trop dense, celui-ci peut réduire la porosité du sol, ce qui offrirait moins de place disponible pour l'eau retenue par ce dernier (MacIvor & Lundholm, 2011).

Par conséquent, tant la biomasse du système racinaire que l'architecture de celui-ci peuvent influencer la capacité de rétention du système. Bien que des études plus approfondies sur l'interaction entre les racines et le substrat offriraient une meilleure compréhension de l'effet de ceux-ci sur la capacité de rétention des toitures vertes, nous pouvons affirmer que c'est par une interaction très étroite avec le substrat que le système racinaire influe sur la performance hydrique du système.

2.5.2.4 Traits foliaires

Étant donné que l'évapotranspiration se déroule en majeure partie au niveau des organes foliaires (Taiz et al., 2015), les caractéristiques individuelles des feuilles influencent la performance hydrique du système via la manière dont elles régulent le processus d'évapotranspiration.

Les plantes ayant des feuilles de grande taille transpirent généralement de manière plus abondante (Geller & Smith, 1982; Smith & Geller, 1980). La surface foliaire spécifique (SLA), couramment utilisée afin de quantifier l'activité physiologique de la plante (Poorter & van der Werf, 1998), est également un bon indicateur du dimensionnement de la feuille. Elle se mesure en calculant le ratio de la surface foliaire sur la masse foliaire sèche. En d'autres termes, une feuille dont la SLA est élevée est une feuille de grande surface et de faible épaisseur, tandis qu'une feuille dont la SLA est faible est une feuille de faible surface et d'épaisseur élevée. Une SLA élevée se traduit souvent par un taux de transpiration élevé de la part de la plante (Volder & Dvorak, 2014; G. C. Wright et al., 1993). La mesure de la longueur de la plus grande feuille d'un individu est également un bon indicateur de la dimension des feuilles de cet individu.

La pilosité foliaire a également une influence importante sur la quantité d'eau transpirée par les feuilles. En effet, les feuilles dont la pilosité est élevée transpirent moins (Baldochi et al., 1983), ce qui signifie que la plante prélèvera donc moins d'eau dans le sol.

Notons également qu'une pilosité élevée permet à l'eau de mieux adhérer à la surface des feuilles, et donc d'être retenue plus facilement par interception directe (Save et al., 2000). Toutefois, il est difficile de prédire si cet effet positif qu'a la pilosité foliaire sur le processus d'interception compenserait l'effet négatif de cette pilosité sur le processus d'évapotranspiration. Des études plus approfondies sur le sujet permettraient éventuellement d'observer si l'un de ces deux processus prend le dessus sur l'autre dans ce cas précis, ou bien si les deux processus se neutralisent.

2.5.2.5 Couvert végétal

Le couvert végétal correspond à la surface ou la proportion de surface d'un écosystème recouverte par de la végétation.

Cette composante n'est pas considérée comme un trait fonctionnel proprement dit étant donné que celle-ci n'est pas un caractère propre à l'individu. Cependant, l'importance de l'influence du couvert sur l'interception des précipitations par l'écosystème ne peut pas être négligée (Belmonte Serrato & Romero Diaz, 1998; Huber & Iroumé, 2001; Pypker et al., 2005). En effet, une surface importante recouvrant le sol constitue une plus grande barrière faisant obstacle aux précipitations (Nagase & Dunnett, 2012).

Par conséquent, toute étude visant à observer l'influence de la végétation sur les flux hydrologiques doit tenir compte du couvert végétal observé.

2.6 Variables météorologiques

Enfin, la grande majorité des phénomènes mentionnés précédemment sont régis par les conditions météorologiques.

La température et le taux d'humidité de l'air, l'intensité du rayonnement solaire, la pression atmosphérique, ou encore la vitesse du vent, ont une influence directe sur la vitesse à laquelle l'eau s'évapore du substrat ou est transpirée par les plantes (Allen et al., 2006; Martínez et al., 2014; Stovin et al., 2013; Tukimat et al., 2012). Ainsi, lorsque les conditions d'humidité entre deux épisodes de précipitations sont élevées, une partie de l'eau retenue lors du premier épisode peut potentiellement ne pas avoir le temps d'être évacuée avant le début du second, ce qui limitera de manière plus ou moins importante la quantité d'eau retenue au cours de ce second épisode de précipitations. Aussi, la quantité d'eau précipitée durant le premier épisode aura également une influence sur la quantité retenue par le second épisode, étant donné qu'une pluie importante engendrera une quantité d'eau plus importante à évacuer par la suite.

Indépendamment des conditions météorologiques antécédentes, la durée et l'intensité d'une pluie influencent également bien évidemment la quantité d'eau pouvant être retenue par le système au cours de celle-ci (Czemiel Berndtsson, 2010; Moran et al., 2003; Nawaz et al., 2015). En effet, une quantité d'eau importante entrant dans le système augmentera forcément la probabilité d'atteinte de la capacité au champ du substrat. Ainsi, la probabilité d'observer une quantité et un débit d'écoulement d'eau importants à travers le système est élevée lorsque la durée et/ou l'intensité des précipitations le sont également.

2.7 Résumé global

Nous avons jusqu'à maintenant décrit progressivement les différents mécanismes et composantes entrant en jeu dans le service de régulation des flux hydriques rendu par les toitures vertes. La méthode employée ici afin de décrire au mieux cet ensemble de phénomènes est inspirée de la cascade des services écosystémiques de Potschin & Haines-Young (2011).

Les deux fonctions entrant en jeu dans le service de régulation des flux hydriques rendu par les écosystèmes de toiture verte sont donc la rétention et la détention d'eau de pluie, eux-mêmes régis par les processus d'interception et d'évapotranspiration. Ces processus sont à leurs tours influencés par les caractéristiques de la végétation et du substrat utilisé (Figure 4).

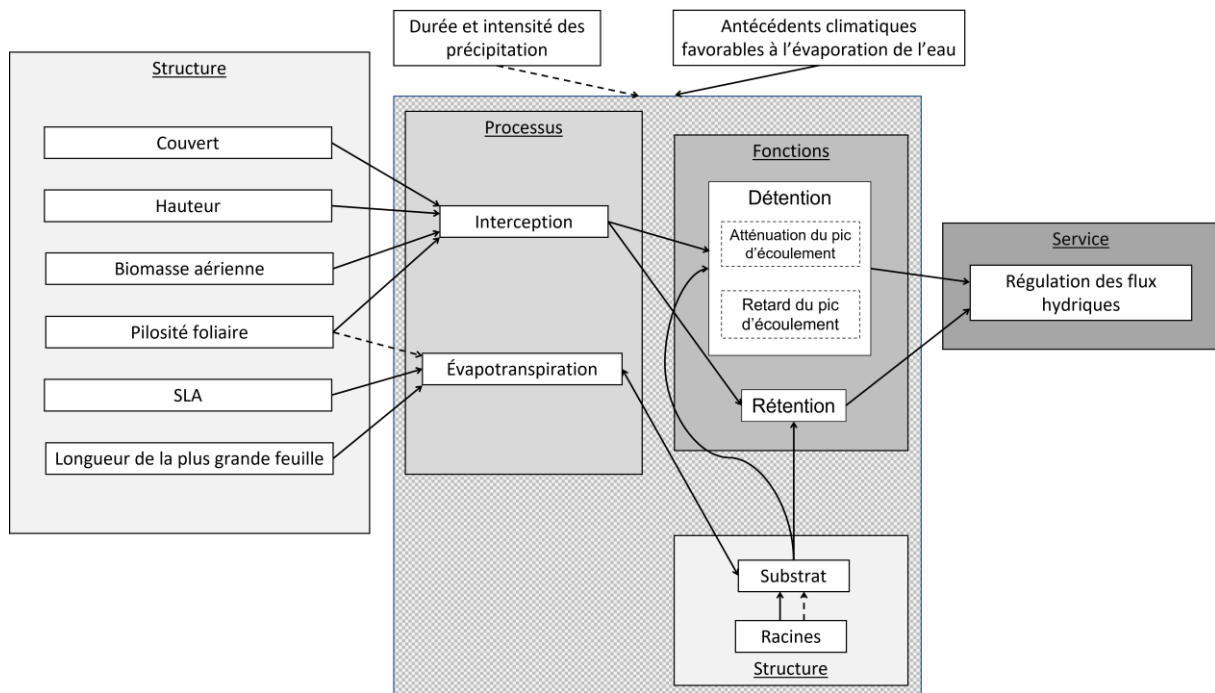


Figure 4 : Schéma général résumant l'ensemble des interactions entre les différentes composantes, ensembles de composantes, ou mécanismes contribuant au service écosystémique de régulation des flux hydriques. Les interactions représentées en trait plein indiquent un effet positif de d'une composante sur une autre, tandis que les interactions représentées en pointillés indiquent un effet négatif d'une composante sur une autre.

3 Question de recherche

L'objectif de ce travail est de mieux comprendre la manière dont la structure d'un écosystème de toiture verte peut influencer le service de régulation des flux hydriques. Pour ce faire, une expérimentation impliquant des bacs représentant des échantillons de toitures vertes a été réalisée.

D'une part, un substrat confectionné par nos soins et dont les matériaux grossiers sont issus de débris de bâtiments recyclés sera comparé à un substrat d'origine commerciale afin de répondre à la question suivante :

Dans quelle mesure le substrat utilisé influe-t-il sur le service de régulation des flux hydrique rendu par les toitures vertes ?

D'autre part, l'effet que peuvent avoir les traits fonctionnels des individus végétaux (couvert, hauteur, biomasse aérienne, biomasse et architecture du système racinaire, SLA, longueur de la plus grande feuille et pilosité foliaire) ainsi que leur occupation de l'espace sera quantifié. Par conséquent, l'expérimentation permettra également de répondre à la question suivante :

Quelles sont les caractéristiques morphologiques des plantes à privilégier lors de l'aménagement d'une toiture verte dans le but d'optimiser le service de régulation des flux hydriques rendu par cette dernière ?

4 Matériels et méthodes

4.1 Site de l'expérimentation

L'expérimentation s'est déroulée sur le parking du bâtiment de Géopédologie de la Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech (50°33'49,3''N ; 4°42'09,3''E). En moyenne, les précipitations cumulées durant les mois de mai et juin (mois durant lesquels s'est déroulée l'expérimentation), sont respectivement de 60,7 mm et de 69,7 mm au niveau de la commune de Gembloux. Une température moyenne de 13,0 °C y est mesurée durant le mois de mai et de 15,9 °C durant le mois de juin (Institut Royal Météorologique belge, 2020 ; période de référence : 1991-2020).

4.2 Description du dispositif expérimental

Les unités expérimentales définies dans le cadre de l'expérimentation sont des bacs de 1 m² représentant des fragments de toitures vertes extensives. Ces échantillons de toitures ont été conçus en suivant le schéma classique d'assemblage d'une toiture verte extensive (Czemieli Berntsson, 2010). Ainsi, le fond de chaque bac a d'abord été tapissé d'une couche de Fixodrain® XD 20 jouant à la fois le rôle de matériel drainant et de filtre textile (Figure 5). Ce dernier a ensuite été recouvert d'une couche de 15 cm de substrat. Tous les bacs ont également été inclinés selon une pente de 2 % le long de leurs deux lignes médianes et n'ont pas été arrosés durant la période de récolte des données.



Figure 5 : Fond drainant placé au sein de chacun des bacs.

Deux substrats différents ont été utilisés. Le premier, le « Substrat léger pour toiture verte Extensif Zinco », est un produit commercial. Le second est un substrat fait par nos soins et composé de matériau recyclé (60 %², débris de briques et de bâtiments fournis par la société Tradecowall), d'engrais organique (30 %², Terreau universel « La Plaine Chassart) et de sable (10 %²).

² Pourcentage par rapport au volume total de substrat.

Ces deux substrats sont bien caractérisés par une teneur élevée en matériaux grossiers (ou sableux), ce qui est la caractéristique principale des substrats utilisés en toitures vertes extensives. La teneur en éléments grossiers ainsi qu'en carbone organique est plus élevée dans le substrat recyclé (Tableau 1).

Tableau 1 : Teneur en carbone organique et proportion en éléments texturaux de chaque substrat. Les substrats ont été analysés par le Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité (Brabant Wallon).

Paramètre	Zinco	Recyclé
Carbone organique (g/Kg)	50	65
Argile (%)	6,6	2,1
Limon (%)	20,7	5,6
Sable (%)	72,7	92,3

La sélection des espèces caractérisant la végétation plantée dans les bacs s'est réalisée dans un premier temps sur base de leur habilité à tolérer les conditions imposées par les toitures vertes extensives. Des tests réalisés auparavant par l'unité ainsi que des mélanges proposés par le commerce ont permis de présélectionner des espèces répondant à ce critère. Ensuite, parmi les espèces présélectionnées et disponibles sous forme de plants dans le commerce, la sélection définitive s'est réalisée de manière à ce que la variation de leurs traits fonctionnels soit la plus large possible (les différentes valeurs de traits relatives aux espèces sélectionnées ont été trouvées dans la littérature). En tout, 19 espèces différentes ont été plantées (Tableau 2).

Tableau 2 : Liste des 19 espèces plantées et nombre de plants par bac.

Espèce	Nombre de plants
<i>Achillea millefolium</i> L., 1753	9
<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm., 1814	6
<i>Anthoxantum odoratum</i> L., 1753	9
<i>Centaurea scabiosa</i> L., 1753	16
<i>Centranthus ruber</i> (L.) DC., 1805	9
<i>Draba aizoides</i> L., 1767	16
<i>Erysimum cheiri</i> (L.) Crantz, 1769	9
<i>Geranium sanguineum</i> L., 1753	9
<i>Helianthemum nummularium</i> (L.) Mill., 1768	9
<i>Helleborus foetidus</i> L., 1753	9
<i>Jasione montana</i> L., 1753	9
<i>Leucanthemum vulgare</i> Lam., 1779	6
<i>Lotus corniculatus</i> L., 1753	9
<i>Onobrychis viciifolia</i> Scop., 1772	6
<i>Polypodium vulgare</i> L., 1753	9
<i>Prunella vulgaris</i> L., 1753	16
<i>Pulmonaria officinale</i> L., 1753	16
<i>Scabiosa columbaria</i> L., 1753	6
<i>Verbascum thapsus</i> L., 1753	6

Chaque bac contient une seule espèce. Les espèces et les types de substrats ont été croisés entre eux et, pour chacun des substrats, un bac contient également uniquement du sol nu. Par conséquent, un total de 40 bacs ont été aménagés (19 espèces + 1 bac de sol nu pour les deux types de substrats). Ces 40 bacs ont été disposés de manière totalement aléatoire selon 8 rangées de 5 bacs (Figure 6).



Zinco	Recyclé	Zinco	Recyclé	Zinco	Recyclé	Recyclé	Recyclé
<i>E. cheiri</i>	<i>S. columbaria</i>	<i>C. ruber</i>	<i>A. odoratum</i>	<i>H. foetidus</i>	<i>C. scabiosa</i>	<i>H. foetidus</i>	<i>P. officinalis</i>
Recyclé	Zinco	Recyclé	Zinco	Recyclé	Zinco	Recyclé	Zinco
<i>L. corniculatus</i>	<i>J. montana</i>	<i>J. montana</i>	<i>D. aizoides</i>	<i>A. sylvestris</i>	<i>P. vulgare</i>	<i>C. ruber</i>	<i>A. odoratum</i>
Zinco	Zinco	Zinco	Zinco	Recyclé	Recyclé	Zinco	Recyclé
Sol nu	<i>P. vulgare</i>	<i>P. officinalis</i>	<i>C. scabiosa</i>	<i>P. vulgaris</i>	<i>E. cheiri</i>	<i>O. viciifolia</i>	<i>A. millefolium</i>
Recyclé	Zinco	Zinco	Recyclé	Zinco	Recyclé	Recyclé	Recyclé
<i>O. viciifolia</i>	<i>G. sanguineum</i>	<i>A. sylvestric</i>	<i>L. vulgare</i>	<i>H. nummularium</i>	<i>G. sanguineum</i>	<i>H. nummularium</i>	<i>D. aizoides</i>
Recyclé	Zinco	Zinco	Zinco	Recyclé	Zinco	Zinco	Recyclé
Sol nu	<i>L. corniculatus</i>	<i>V. thapsus</i>	<i>L. vulgare</i>	<i>V. thapsus</i>	<i>S. columbaria</i>	<i>A. millefolium</i>	<i>P. vulgare</i>

Figure 6 : En haut, vue aérienne du dispositif expérimental. En bas, représentation schématique du dispositif indiquant la combinaison substrat-espèce présente dans chaque bac.

Afin de s'assurer que la strate végétale s'étende sur toute la surface du bac, le nombre d'individus plantés dans chaque bac varie entre 6, 9 ou 16 plants (selon la taille théorique d'un individu de l'espèce définie dans la littérature). Dans chaque bac, les traits fonctionnels définis dans le paragraphe 2.5.2 et de la densité de couvert ont été mesurés.



Figure 7 : Seau relié à l'un des bacs servant à collecter l'eau de pluie.

Enfin, chaque bac est relié à un seau via une gouttière afin que l'eau de pluie s'infiltrant à travers ceux-ci puisse être récoltée (Figure 7).

Pour rappel, dans le cadre de cette expérience, ce sont les valeurs de traits fonctionnels mesurés dans les bacs ainsi que le type de substrat qui constituent les facteurs de variation entre les unités expérimentales. Les espèces n'ont été désignées que dans le but de faire varier les différentes valeurs de traits fonctionnels d'un bac à l'autre.

4.3 Collecte des données

Officiellement, la période de collecte de ces données a commencé le 04 mai étant donné qu'aucune précipitation n'a eu lieu avant cette date. Et elle s'est terminée le 01 juillet, le lendemain de la dernière journée de pluie de la période.

4.3.1 Collecte des données liées à la rétention d'eau

La quantité d'eau (en mm) écoulee à travers les bacs a été mesurée régulièrement durant l'expérimentation au cours de mesures ponctuelles. Le pas de temps entre les prises de données successives variait en fonction de l'intensité des précipitations. Par exemple, si les pluies étaient abondantes, un relevé par jour était effectué. Lorsque les pluies étaient moins abondantes, plusieurs jours pouvaient s'écouler entre deux relevés successifs. Cependant, la fréquence des relevés était telle que l'écoulement mesuré était toujours causé par des périodes s'étendant sur maximum trois journées de pluies consécutives.

En parallèle, les données de précipitations ont été mesurées grâce à une station météorologique présente sur le site de l'expérimentation. La station utilisée est une « Station météo professionnelle wifi avec capteur 6 en 1 et interface ordinateur Bresser® ». Cette station a été réglée de manière à fournir des données de précipitations selon un pas de temps de 30 minutes.

Sur base des données d'écoulement et de précipitations, nous sommes donc capables d'identifier ce qui entre (pluie) dans le système et ce qui en sort (écoulement) durant une période précise, et d'en déduire le taux de rétention calculé comme suit :

$$R = \frac{P - E}{P} * 100$$

Avec R le taux de rétention (exprimé en %), P la quantité d'eau précipitée durant la période (exprimée en mm) et E la quantité d'eau écoulee à travers le bac (convertie en mm).

En raison de précipitations trop intenses ayant fait déborder les seaux la nuit du 20 au 21 juin, les données du 20 juin à partir de 23h et du 21 juin (journée complète) ont été perdues et n'ont pas été prises en compte lors de l'analyse. Il en est de même pour les données allant du 22 mai (journée complète) au 25 mai au matin (10h).

4.3.2 Collecte des données liées à la détention d'eau

Le 25 mai, une averse a pu être suivie afin de quantifier la capacité de détention du système. Pour ce faire, les seaux ont été remplacés par des éprouvettes graduées de 1 L et la station

météorologique a été réglée de manière à mesurer l'intensité des précipitations selon un pas de temps de 5 minutes.

L'averse a commencé à 14h45. Avant de démarrer le suivi, nous nous sommes assurés qu'aucun écoulement lié aux pluies précédente n'ait interféré avec la pluie suivie. À partir du moment où l'averse a débuté, la quantité d'eau écoulée à travers les bacs a été mesurée toutes les 5 minutes, ce qui nous a permis de déduire l'évolution du débit d'écoulement au cours de l'averse (selon un pas de temps de 5 minutes).

Afin de quantifier la capacité de rétention d'eau des bacs, le pourcentage d'atténuation du pic d'écoulement a été calculé pour chaque bac, tout comme le délai (en minutes) entre le pic de précipitations et ce même pic d'écoulement. Ces deux concepts ont été définis en détail dans le paragraphe 2.3.2.

Le taux d'atténuation du pic d'écoulement (exprimé en %) a été calculé comme suit :

$$\frac{P_{max} - E_{max}}{P_{max}} * 100$$

Avec P_{max} l'intensité maximale de précipitations (en mm/h) et E_{max} le débit d'écoulement maximal à travers le bac (en mm/h).

4.3.3 Mesure de la teneur en eau volumétrique des substrats

Étant donné le rôle important joué par la variation de la teneur en eau du substrat sur la performance hydrique du système (Stovin et al., 2013, 2015; Villarreal, 2007), le taux d'humidité volumétrique a été mesuré en continu dans le substrat d'une partie des bacs.

En tout, 12 capteurs d'humidité Meter Environment® TEROS 11 ont été placés. Les bacs munis de capteurs ont été choisis de manière à ce que les valeurs des traits mesurés varient le plus possible entre les bacs choisis. Ainsi, les capteurs ont été placés dans les bacs contenant les espèces *Anthoxanthum odoratum*, *Draba aizoides*, *Erysimum cheiri*, *Onobrychis viciifolia*, *Verbascum thapsus* ainsi que dans les bacs contenant du sol nu. L'opération a été répétée pour les deux types de substrats (6 capteurs par substrat donc).

Les capteurs n'ayant pu être placés dans les bacs qu'à partir du 07 mai, les analyses tenant compte du taux d'humidité dans le substrat ne concernent que les données collectées à partir de cette date.

4.3.3.1 Calibration des capteurs d'humidité

Avant d'être utilisés, les capteurs d'humidité ont dû être calibrés de manière à ce que les données fournies par ceux-ci soient compatibles avec les substrats utilisés.

Pour ce faire, un premier échantillon de substrat séché à l'air libre a été prélevé et pesé (en g) une première fois, puis une seconde fois après avoir été séché à l'étuve (étuve BINDER ED 240), afin de déduire la teneur en eau gravimétrique du substrat lorsque celui-ci est séché à l'air libre ($\omega_{air\ libre}$, g/g)

$$\omega_{\text{air libre}} = \frac{\text{Masse de l'échantillon séché à l'air} - \text{Masse de l'échantillon séché à l'étuve}}{\text{Masse de l'échantillon séché à l'étuve}}$$

Un second échantillon de substrat séché à l'air libre de volume connu (en cm³) a été prélevé et pesé (M_0 , en g). La masse sèche ($M_{\text{sèche}}$, en g) de ce second échantillon a pu être calculée sur base de la connaissance de la valeur de $\omega_{\text{air libre}}$:

$$M_{\text{sèche}} = M_0 - M_0 * \omega_{\text{air libre}}$$

Connaissant la masse sèche de l'échantillon et son volume, sa masse volumique apparente (ρ , en g/cm³) a pu être calculée :

$$\rho = \frac{M_{\text{sèche}}}{\text{Volume de l'échantillon}}$$

À cet échantillon ont été ajoutés graduellement des volumes connus d'eau. Avant chaque ajout d'eau, l'échantillon a été pesé ($M_{\text{sol+eau}}$, en g) et le capteur d'humidité a été placé deux fois en son sein (à deux positions différentes) afin d'obtenir deux valeurs brutes du taux d'humidité. La teneur en eau volumétrique réelle (θ , en m³/m³) du substrat a pu être déduite au départ de la différence entre la masse mesurée une fois le volume d'eau ajouté et la masse sèche de l'échantillon (M_{eau} , en g):

$$1) M_{\text{eau}} = M_{\text{sol+eau}} - M_{\text{sèche}}$$

$$2) \text{ Teneur en eau gravimétrique réelle } (\omega_{\text{réelle}}, \text{ en g/g}) = \frac{M_{\text{eau}}}{M_{\text{sèche}}}$$

$$3) \theta = \omega_{\text{réelle}} * \rho$$

$$\text{Rappel : } 1 \text{ g d'eau} = 1 \text{ cm}^3$$

Cette manipulation a été réalisée pour les deux substrats et a ainsi permis d'obtenir pour chaque substrat un jeu de données associant les taux d'humidité réels avec les données brutes fournies par les capteurs. Une équation prédisant le taux d'humidité volumétrique réel en fonction des données brutes a ensuite été ajustée par régression. Plusieurs modèles de régression ont été testés, et le modèle polynomial de degré 2 a été conservé pour les deux substrats. Les détails de chacun des deux modèles ajustés peuvent être consultés dans l'Annexe 1. Les courbes illustrant les deux équations peuvent être visualisées dans l'Annexe 2.

4.3.4 Mesure des traits fonctionnels et du couvert

4.3.4.1 Hauteur

Dans chaque bac, la hauteur (en cm) de chaque plant présent au sein de ceux-ci a été mesurée, la hauteur d'un plant étant considérée comme étant la distance entre le point le plus haut du plant et sa projection orthogonale sur le plan formé par la surface du substrat. Ensuite, la hauteur moyenne a été calculée dans chaque bac.

Cette opération a été répétée une fois par mois (le 20 mai et durant la semaine du 14 au 18 juin).

4.3.4.2 *Longueur de la plus grande feuille*

Pour chaque bac, la longueur (en cm) de la plus grande feuille de chaque plant été mesurée, la longueur de la plus grande feuille étant considérée comme étant la distance entre la base du pétiole et le sommet du limbe ou de la foliole supérieure. Ensuite, la longueur moyenne de la plus grande feuille a été calculée dans chaque bac.

Cette opération a été répétée une fois par mois (le 20 mai et durant la semaine du 14 au 18 juin).

4.3.4.3 *Surface foliaire spécifique (SLA)*

Une feuille a été prélevée aléatoirement dans chacun des bacs. Ces feuilles ont été scannées à l'aide d'un appareil Epson Perfection™ V550 Photo. La surface de celles-ci (en cm²) a été mesurée grâce au logiciel ImageJ.

Ces feuilles ont ensuite été séchées (étuve Memmert UFE 600) puis pesées (balance Mettler Toledo XA105 dualrange, précision allant jusqu'à 0,0001 g). La Surface foliaire spécifique a ensuite pu être calculée via le rapport :

$$SLA = \frac{\text{Surface foliaire (cm}^2\text{)}}{\text{Masse sèche (g)}}$$

Les feuilles ont été prélevées le 30 juin. Nous avons fait l'hypothèse que la masse d'une feuille sèche ainsi que la surface foliaire d'une plante évoluaient à une vitesse relativement similaire. Pour cette raison, la SLA a été supposée comme étant un rapport constant entre ces deux paramètres. Ainsi, ce trait n'a été mesuré qu'une fois sur la période et est considéré comme valable pour l'ensemble de celle-ci.

4.3.4.4 *Biomasse aérienne et biomasse souterraine sèche*

Afin de ne pas endommager la végétation présente dans les bacs, d'autres individus ont été plantés dans des pots afin que ces derniers puissent être prélevés et pesés par la suite.

À chaque bac a été associé un pot contenant le même substrat (même profondeur également) et la même espèce, chaque pot contenant un individu.

Les plantes ont été prélevées de leurs pots entre le 13 et le 18 juin. Leurs systèmes racinaires et aériens ont été séparés les uns des autres puis ont été séchés à l'étuve (étuve Memmert UFE 600) avant d'être finalement pesés à l'aide d'une balance Kern® 440 (précision allant jusqu'à 0,01 g).

Afin d'étendre cette valeur de trait fonctionnel à l'ensemble de la population présente dans un bac, la biomasse (aérienne et souterraine) mesurée pour chaque individu a été multipliée par le nombre de plants présents dans leurs bacs respectifs.

Ces valeurs n'ayant été prise que durant le mois de juin, elles n'ont été prises en compte que lors des analyses relatives aux données prélevées durant ce mois.

4.3.4.5 Pilosité foliaire

Dans chaque bac, une catégorie de pilosité foliaire a été attribuée à la végétation : faible, modérée, ou élevée. Cette attribution a été réalisée le 19 juillet.

4.3.4.6 Architecture du système racinaire

En même temps que les mesures de la biomasse souterraine, l'architecture du système racinaire de chaque plante a été évaluée visuellement et classée en deux catégories : fibreux ou pivotant.

4.3.4.7 Couvert

De base, le choix du nombre de plants variable entre les différents bacs avait pour but de standardiser le couvert végétal entre ceux-ci, et donc de limiter un effet potentiellement trop important du couvert sur les capacités de rétention d'eau et de détention d'eau des bacs par rapport aux traits fonctionnels mesurés.

Cependant, en raison d'un délai court entre la plantation des bacs et la collecte des données, ainsi que le développement non optimal de certaines espèces au sein des substrats utilisés en raison des conditions de stress hydrique imposées par ces derniers, la végétation n'a pas pu atteindre un même état de développement au sein de tous les bacs (Figure 6). Par conséquent, une variation importante du couvert entre les différents bacs n'a pas pu être évitée durant la période de l'expérimentation. Le couvert a donc également dû être considéré comme une variable explicative de la variation des performances hydriques des bacs, bien que celui-ci ne soit pas réellement considéré comme un trait fonctionnel.

Ainsi, le couvert a été estimé dans chaque bac via la méthode des points-quadrats. Cette méthode consiste en la superposition d'une structure contenant une plaque en plexiglass de 1 m² par-dessus l'un des bacs. Cette plaque est perforée de 100 trous équidistants entre eux. Une tige est ensuite poussée dans chaque trou jusqu'à atteindre le substrat. Le nombre de fois où la tige entre en contact avec de la végétation est comptabilisé (attention, on considère que la tige entre en contact avec la végétation maximum une fois par passage). Le couvert (en %) est alors estimé comme suit :

$$\text{Couvert} = \frac{\text{Nombre contacts avec de la végétation}}{\text{Nombre de passages (ou nombre de trous)}} * 100$$

Cette opération a été répétée une fois par mois durant la période de l'expérimentation. Les mesures de ce trait ont été réalisées le 21 mai et du 23 au 24 juin.

4.3.4.8 Combinaison « Hauteur x Couvert »

Enfin, afin de quantifier également l'effet de la disposition de la végétation dans l'espace sur la performance hydrique du système, l'interaction entre la hauteur moyenne et le couvert a également été testée. Pour ce faire, le couvert estimé a d'abord été converti en m² :

$$\text{Couvert (m}^2\text{)} = \frac{\text{Couvert (\%)}}{100} * \text{Surface du bac (m}^2\text{)}$$

Ce qui a permis d'obtenir une donnée volumique (m^3) obtenue via la multiplication de ce couvert avec la hauteur moyenne mesurée dans les bacs :

$$\text{Hauteur} \times \text{Couvert} (m^3) = \text{Hauteur moyenne} (m) * \text{Couvert} (m^2)$$

4.4 Analyse des données

Toutes les analyses réalisées ci-après l'ont été à l'aide du logiciel Rstudio® (R statistical software).

4.4.1 Rétention d'eau

4.4.1.1 Taux de rétention mensuel et comparaison des deux substrats

Dans chaque bac, le taux de rétention mensuel a été calculé lors de chaque mois. Ce taux de rétention a été calculé sur base de la somme des données d'écoulement et de précipitations mesurées sur l'ensemble du mois. Les moyennes par substrat de ces taux de rétention mensuels ont alors été comparées entre elles lors de chaque mois afin d'identifier d'éventuelles différences de comportement entre les substrats.

4.4.1.2 Effet des précipitations et du taux d'humidité du substrat sur la capacité de rétention d'eau du système (périodes de trois jours)

Les mesures d'écoulement et de précipitations ont été regroupées en périodes de trois jours consécutifs afin d'assurer un niveau de résolution constant entre les différentes données. Lors de chacune de ces périodes, un taux de rétention a été calculé pour chaque bac. Bien entendu, seules les périodes durant lesquelles des précipitations ont eu lieu ont été retenues pour l'analyse.

Le taux d'humidité mesuré au moment de la première pluie (H_0) de chaque période a également été mesuré dans chacun des bacs munis d'un capteur.

Des régressions multiples ont été ajustées (méthode stepwise régressive). La variable à expliquer est le taux de rétention (une observation = le taux de rétention mesuré dans un bac muni d'un capteur d'humidité durant l'une des périodes), et les variables explicatives sont le taux H_0 et la somme des précipitations mesurés durant chacune des périodes. Un modèle a été ajusté par substrat.

En cas d'effet significatif de la part de l'une des deux variables explicatives dans les deux substrats, l'effet individuel de celle-ci a été comparé entre les deux substrats via l'ajustement de droites de régression simple mettant en relation les taux de rétention mesurés dans les bacs avec cette variable.

4.4.1.3 Influence de la végétation sur la capacité de rétention des bacs

Des modèles de régression multiple ont été ajustés (méthode stepwise régressive). La variable à expliquer est le taux de rétention mensuel (une observation = le taux de rétention mensuel mesuré dans un bac), et les variables explicatives sont les valeurs de traits fonctionnels et le couvert mesurés dans les bacs. En raison de l'effet non négligeable de ces variables

météorologiques sur la capacité de rétention du système (Allen et al., 2006; Czemieli Berndtsson, 2010; Nawaz et al., 2015; Tukimat et al., 2012), et la forte variation de celles-ci entre le mois de mai et le mois de juin, 4 modèles ont été ajustés (un par mois et par substrat).

Les variables explicatives prises en compte dans les deux régressions du mois de mai sont la hauteur moyenne, la SLA, la longueur de la plus grande feuille, la combinaison « Hauteur x Couvert » et le couvert.

Les variables explicatives prises en compte dans les deux régressions du mois de juin sont la hauteur moyenne, la SLA, la longueur de la plus grande feuille, la biomasse aérienne sèche, la biomasse souterraine sèche, la combinaison « Hauteur x Couvert » et le couvert.

Ensuite, une analyse en composantes principales (ACP) mettant en relation les différentes variables explicatives a été réalisée pour chaque mois et chaque substrat afin d'identifier les éventuelles colinéarités entre ces variables.

L'influence ou non des traits fonctionnels non quantitatifs (pilosité et architecture du système racinaire) sur la capacité de rétention du système a pu être mise en évidence à l'aide d'analyses de la variance à un critère de classification (AV1, la variable à expliquer étant le taux de rétention mensuel et le facteur de variation étant le trait fonctionnel concerné). Une AV1 a été réalisée pour chaque trait discontinu lors de chaque mois et dans chaque substrat.

L'effet individuel sur le taux de rétention mensuel des traits fonctionnels quantitatifs les plus significatifs a été mis en graphique via l'ajustement de droites de régression linéaire simple (une par mois et par substrat) afin de comparer l'effet de celui-ci entre les mois et les substrats.

4.4.2 Détention d'eau

Dans un premier temps, les taux d'atténuation du pic d'écoulement moyens par substrat ont été comparés entre eux afin d'identifier d'éventuelles différences de comportement entre les substrats. La même opération a été réalisée pour le délai entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations.

Ensuite, des régressions multiples (méthode stepwise régressive) ont été réalisées. Les variables à expliquer étant le taux d'atténuation du pic d'écoulement ainsi que le délai entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations, et les variables explicatives sont les traits fonctionnels et le couvert mesurés dans les bacs. Une régression a été réalisée par substrat et par variable à expliquer (une observation = la valeur de la variable à expliquer mesurée dans un bac). Si nécessaire, les colinéarités observées dans les ACP réalisées au point précédent ont également été prises en compte.

Les variables explicatives prises en compte dans chacun des modèles sont la hauteur, la SLA, la longueur de la plus grande feuille, la combinaison « Hauteur x Couvert » et le couvert.

L'influence ou non des traits fonctionnels discontinus (pilosité et architecture du système racinaire) sur le taux d'atténuation du pic et le délai entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations a également été mise en évidence à l'aide d'AV1. Une AV1 a été réalisée par trait discontinu, par variable à expliquer, et par substrat.

5 Résultats

5.1 Rétention

5.1.1 Taux de rétention mensuel et comparaison des substrats

Le mois de mai est caractérisé par des précipitations fréquentes et d'intensités faibles à modérées. Le mois de juin, lui, a connu des épisodes de précipitations moins fréquents mais beaucoup plus intenses (Figure 8- A).

Au total, 70,4 mm de pluie ont été mesurés en mai (dont 48,0 mm ayant pu être pris en compte lors de l'analyse des données), contre 169,4 mm en juin (dont 119,9 mm ayant pu être pris en compte lors de l'analyse des données). Aussi, une température moyenne de $12,0\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$ a été observée en mai contre $19,4\text{ °C} \pm 0,3\text{ °C}$ en juin.

Globalement, le taux d'humidité mesuré dans les bacs est en moyenne supérieur dans le substrat recyclé. Ce substrat semble également s'assécher plus lentement que le substrat Zinco (Figure 8 - C). En effet, la courbe illustrant l'évolution du taux d'humidité moyen mesuré dans le substrat Zinco se creuse plus entre deux épisodes de précipitations que dans le substrat recyclé.

De manière générale, les taux de rétention mesurés ponctuellement dans les bacs sont les plus faibles lorsque les précipitations et/ou le taux d'humidité dans le substrat sont élevés (Figure 8).

Le taux de rétention mensuel moyen mesuré dans les bacs est largement plus important en mai qu'en juin ($72,6 \pm 1,6\text{ \%}^3$ contre $44,4\text{ \%} \pm 2,1\text{ \%}$).

Aussi, ce taux de rétention mensuel est en moyenne supérieur dans les bacs contenant du substrat recyclé, peu importe le mois (Tableau 3). Cette différence est significative lors de chaque mois (tests *t* de comparaison de deux moyennes de Welch, les résultats de ces tests sont consultables en Annexe 3). Notons toutefois que la significativité de cette différence est plus marquée au cours du mois de juin (différence de $9,5\text{ \%} \pm 2,9\text{ \%}$ durant ce mois contre une différence de $3,3\text{ \%} \pm 3,0\text{ \%}$ durant le mois de mai).

Tableau 3 : Taux de rétention mensuels moyens calculés par mois et par substrat.

Mai	Zinco	$71,0\text{ \%} \pm 2,2\text{ \%}$
	Recyclé	$74,3\text{ \%} \pm 2,3\text{ \%}$
Juin	Zinco	$39,7\text{ \%} \pm 2,1\text{ \%}$
	Recyclé	$49,2\text{ \%} \pm 2,2\text{ \%}$

³ Lors de chaque calcul de valeur moyenne, un intervalle de confiance est également attribué à cette dernière. La demi-longueur de cet intervalle est calculé selon la formule de Student (α fixé à 0,05) : $t_{0,975} * \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}$; avec $t_{0,975}$ une variable *t* de Student à (n-1) degré de liberté et dont la fonction de répartition est égale à 0,975 ($1 - \frac{\alpha}{2}$), $\hat{\sigma}$ l'écart-type de l'échantillon sur base duquel est calculée la moyenne, et n la taille de cet échantillon.

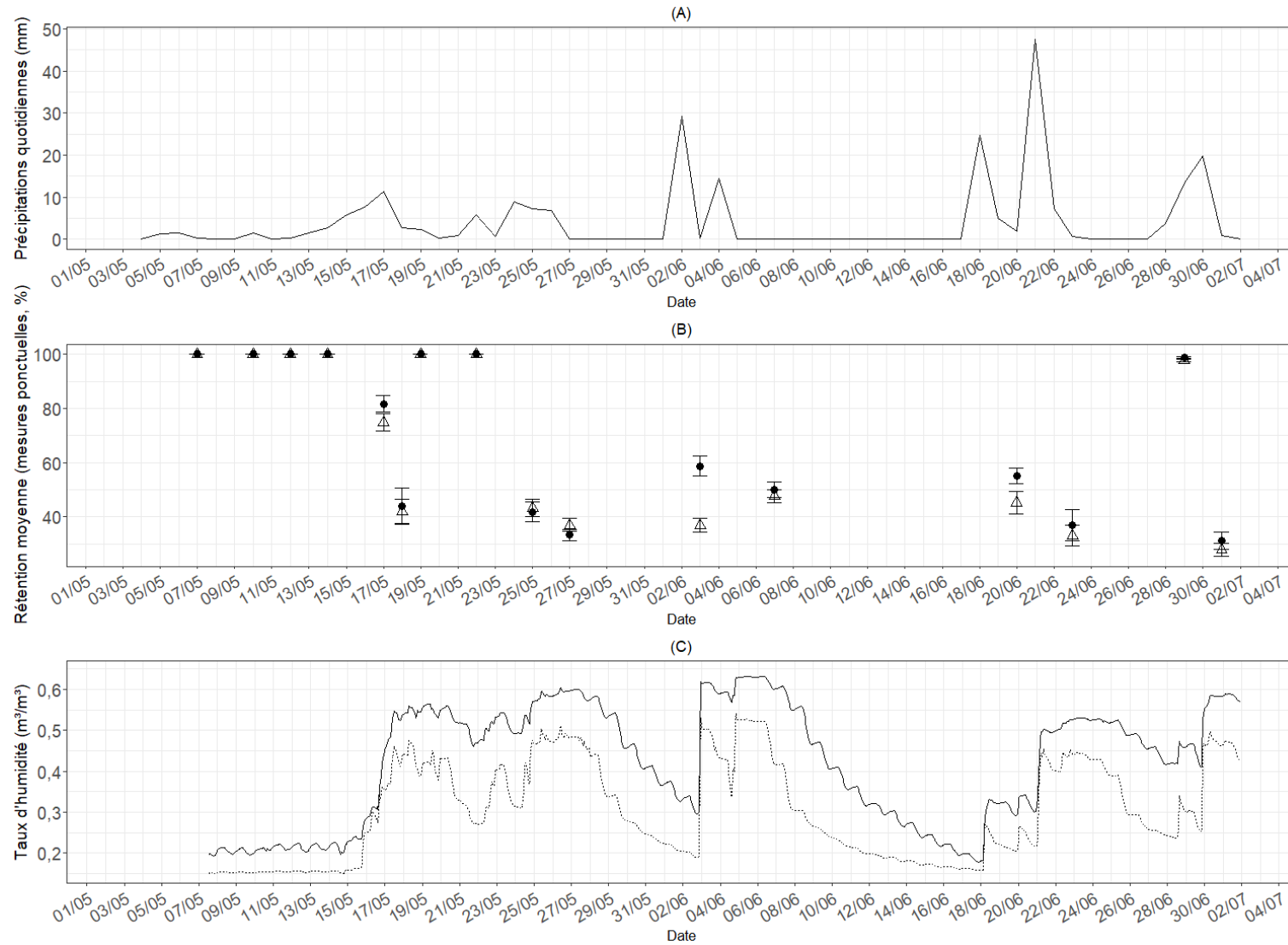


Figure 8 : **(A)** Évolution des précipitations quotidiennes sur la période de prises de données. **(B)** Taux moyens de rétentions basés sur l'ensemble des mesures ponctuelles réalisées durant la période de collecte des données. Un point correspond au taux de rétention moyen calculé sur base des données d'écoulement et de précipitations mesurées sur la période s'étant écoulée entre la mesure précédente et celle-ci. **Points noirs** : taux de rétention moyens calculés dans les bacs contenant le substrat recyclé ; **Triangles blancs** : taux de rétention moyens calculés dans les bacs contenant le substrat Zinco. Remarque : le 07/06, il a plu 0,3 mm sur la journée, cette valeur est tellement basse que l'on pourrait croire qu'elle est égale à 0 sur le graphique. **(C)** Évolution du taux d'humidité mesuré en continu au sein des bacs munis de capteurs sur l'ensemble de la période de prise de données. **Trait plein** : taux d'humidité moyen mesuré dans le substrat recyclé ; **Trait pointillé** : taux d'humidité moyen mesuré dans le substrat Zinco.

À une échelle de temps plus petite, l'écart entre les taux de rétention moyens par substrat est moins important lorsque les épisodes de précipitations se succèdent rapidement. Dans ces conditions, il peut même arriver d'observer un taux de rétention moyen plus élevé dans le substrat Zinco lors des mesures ponctuelles (Figure 8 - B).

En mai, une minorité de bacs contenant du substrat recyclé ont été caractérisés par un taux de rétention mensuel très élevé (> 80 %), ce qui a tiré la moyenne de ce taux de rétention vers le haut pour ce substrat (Figure 9). Les trois bacs dans cette situation sont les bacs contenant les espèces *Achillea millefolium* (taux de rétention mensuel égal à 84,9 %), *Leucanthemum vulgare* (taux de rétention mensuel égal à 81,9 %), et *Anthoxanthum odoratum* (taux de rétention mensuel égal à 80,7 %).

En juin, le taux de rétention mensuel mesuré dans le bac contenant le substrat Zinco et l'espèce *Lotus corniculatus* était très élevé en comparaison avec les autres bacs contenant le même substrat (taux de rétention égal à 57,5 %, Figure 9).

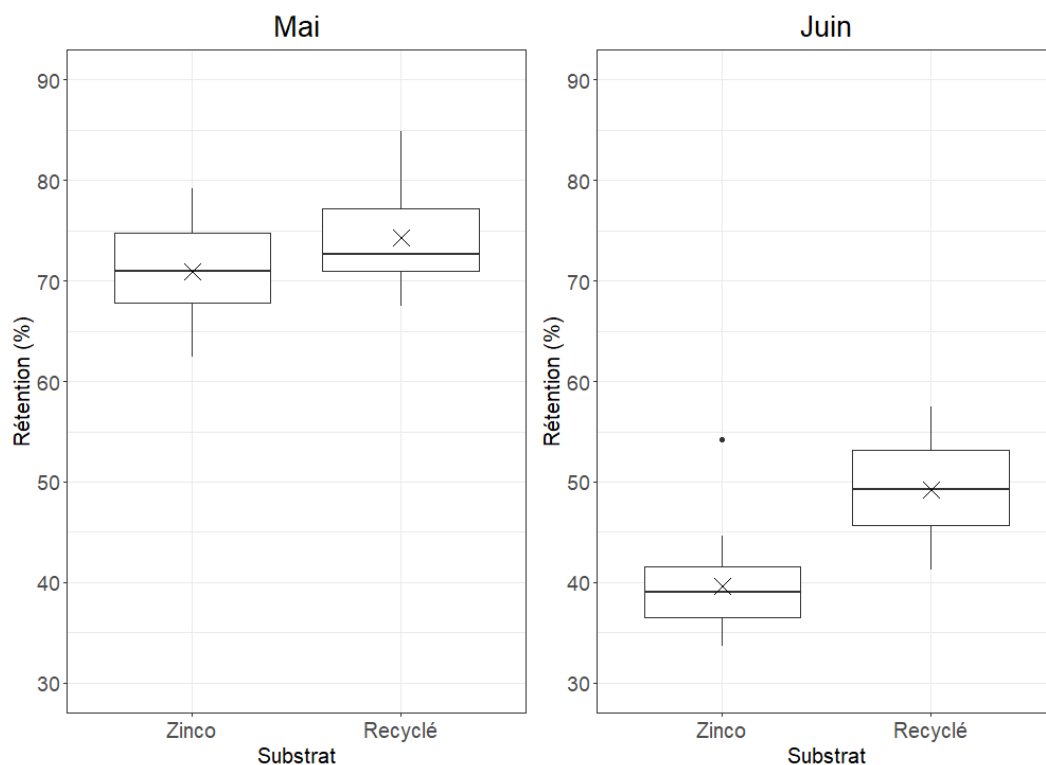


Figure 9 : Graphiques box-plot représentant la dispersion des mesures de taux de rétention mensuels dans les bacs pour chaque substrat. Un graphique a été réalisé par mois. Les croix noires représentent les valeurs moyennes des observations. Le point représenté dans le graphique relatif au mois de juin correspond à la valeur du taux de rétention mesurée dans le bac contenant du substrat Zinco et l'espèce *Lotus corniculatus*, qui est bien plus élevée que dans les autres bacs qui lui sont analogues.

5.1.1.1 Effet des précipitations et du taux d'humidité du substrat sur la capacité de rétention d'eau du système (périodes de trois jours)

Afin d'améliorer la rigueur de la suite de cette analyse, l'ensemble des données de rétention d'eau ont été regroupées en périodes de trois jours successifs. Le taux d'humidité mesuré au départ de la première pluie (H_0) ainsi que la somme de précipitations observées ont également été associés à ces périodes (Figure 10).

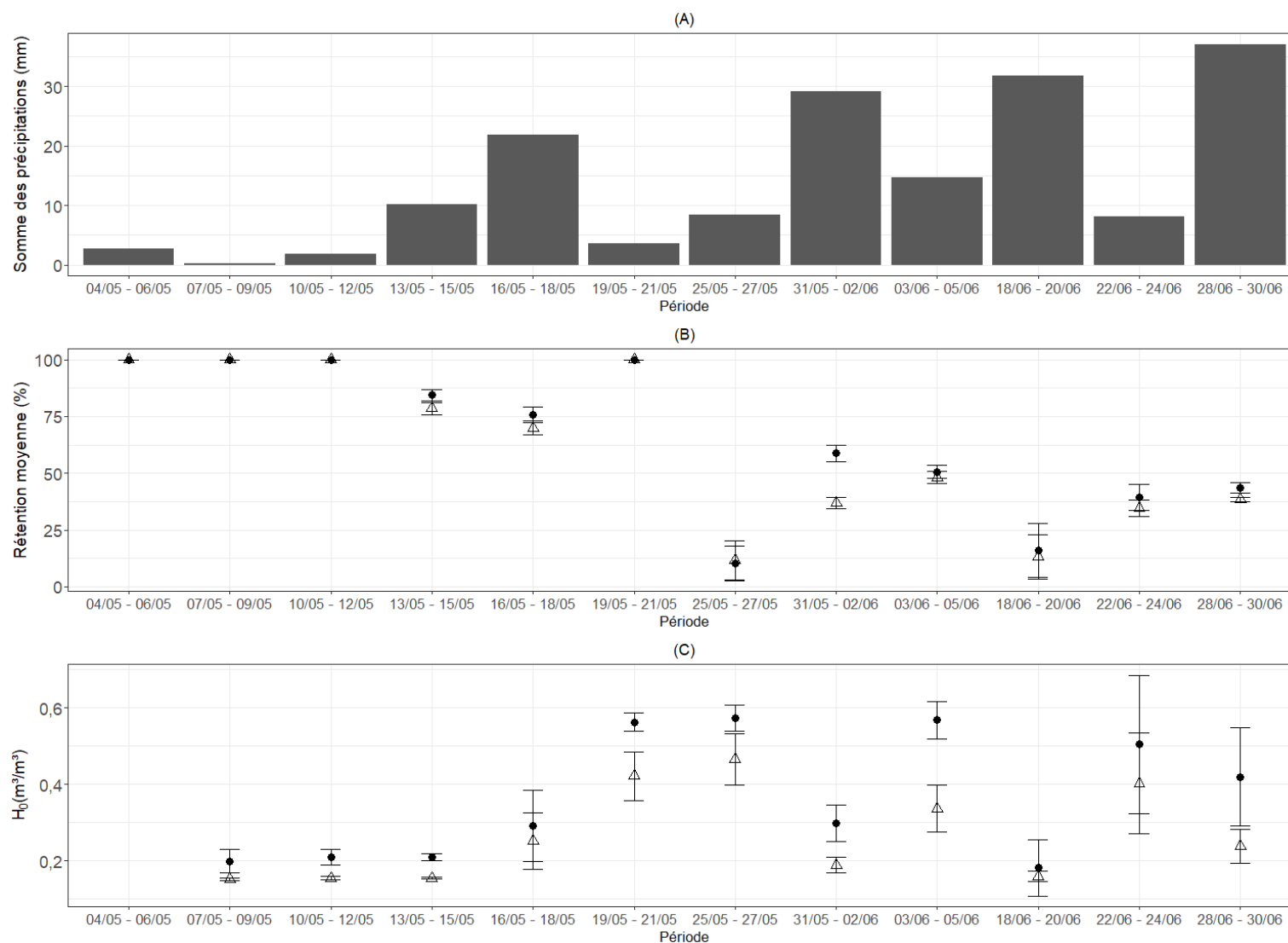


Figure 10 : **(A)** Somme des précipitations sur chaque période de 3 jours enregistrée. **(B)** Taux moyens de rétention basés sur les différentes périodes de 3 jours enregistrées. **Points noirs** : taux de rétention moyens calculés dans les bacs contenant le substrat recyclé ; **Triangles blancs** : taux de rétention moyens calculés dans les bacs contenant le substrat Zinco. **(C)** Taux d'humidité moyens mesurés dans les bacs munis de capteurs au moment de la première pluie de chacune des périodes de 3 jours enregistrées. **Points noirs** : taux d'humidité moyens mesurés dans le substrat Recyclé ; **Triangles blancs** : taux d'humidité moyens mesurés dans le substrat Zinco.

Les résultats de la régression multiple relative au substrat Zinco met en évidence un effet très hautement significatif de H_0 et de la somme des précipitations sur le taux de rétention. Environ 57,3 % de la variabilité du taux de rétention entre les bacs et entre les périodes peut être expliquée par le modèle (Tableau 4).

Tableau 4 : Résumé du modèle de régression mettant en relation les taux de rétention mensuels mesurés lors de chaque période dans les bacs munis de capteurs d'humidité et contenant le substrat Zinco avec H_0 et la somme des précipitations sur les différentes périodes.

Éléments retenus par le modèle	Coefficient estimé	P-valeur
Ordonnée à l'origine	113,93	< 0,001 ***
Précipitations	-1.65	< 0,001 ***
H_0	-97,35	< 0,001 ***
Qualité du modèle		
R ² ajusté		0,573
Écart-type résiduel		17,17
Nombre d'observations		59

Les résultats de la régression multiple relative au substrat recyclé montrent également une influence très hautement significative des deux variables explicatives sur la capacité de rétention des bacs. Dans ce cas-ci, environ 52,5 % de la variabilité du taux de rétention entre les bacs contenant le substrat recyclé est expliquée par le modèle (Tableau 5).

Tableau 5 : Résumé du modèle de régression mettant en relation les taux de rétention mensuels mesurés lors de chaque période dans les bacs munis de capteurs et contenant le substrat recyclé avec H_0 et la somme des précipitations sur les différentes périodes.

Éléments retenus par le modèle	Coefficient estimé	P-valeur
Ordonnée à l'origine	114,30	< 0,001 ***
Précipitations	-1,17	< 0,001 ***
H_0	-84,67	< 0,001 ***
Qualité du modèle		
R ² ajusté		0,526
Écart-type résiduel		17,62
Nombre d'observations		60

La relation entre les taux de rétention mesurés dans les bacs et les sommes des précipitations observées durant chaque périodes est légèrement plus marquée dans le substrat Zinco (Figure 11, coefficient de régression simple égal à -1,8 dans le Zinco et égal à -1,5 dans le recyclé ; $p < 0,001$ *** dans les deux cas). Cependant, statistiquement, ces relations ne diffèrent pas significativement entre les substrats (ancova, pour l'interaction Substrat x Précipitations : $df = 1$; $F = 2,24$; p -valeur = 0,138).

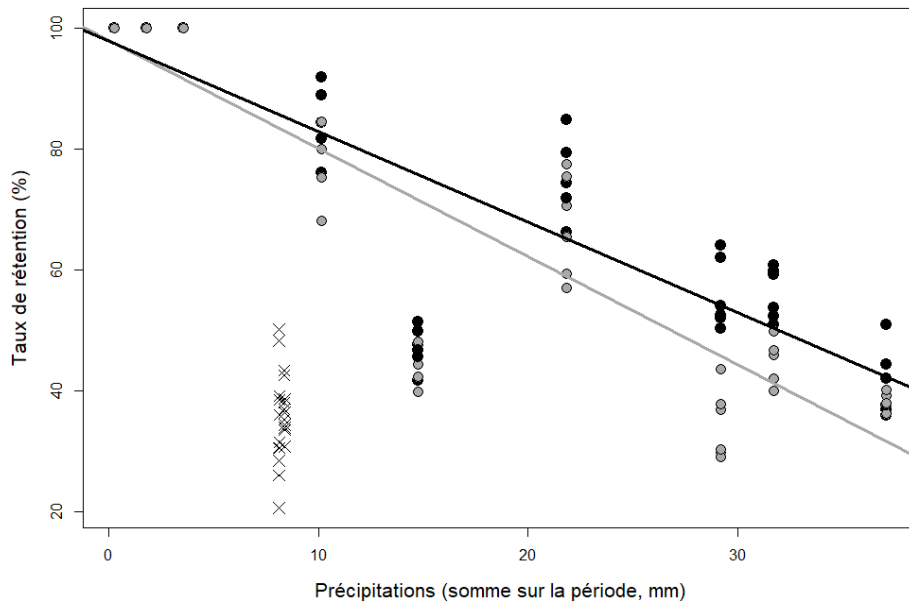


Figure 11 : Relation entre les taux de rétention mesurés dans les bacs munis de capteurs d'humidité et les sommes des précipitations mesurées sur les différentes période. Un point représente une mesure réalisée dans un bac. Les droites sont les droites de régression simple modélisant ces relations. **En gris** : mesures relatives au substrat Zinco. **En noir** : mesures relatives au substrat recyclé. Les croix représentent les données des périodes allant du 25/05 au 27/05 et du 22/06 au 24/06. Ces périodes sont caractérisées par des taux d'humidité très élevé causant un taux de rétention faible malgré les précipitations relativement faibles. Ces données n'ont donc pas été prises en compte par ces modèles de régression simple.

La relation entre les taux de rétention mensuels mesurés dans les bacs et H_0 est assez similaire entre les deux substrats. En effet, les droites de régressions simples mettant en relation ce taux de rétention avec H_0 sont à peu de choses près parallèles (Figure 12 ; coefficient de régression simple égal à -94,2 dans le Zinco et égal à -101,3 dans le recyclé ; $p < 0,001$ *** dans les deux cas).

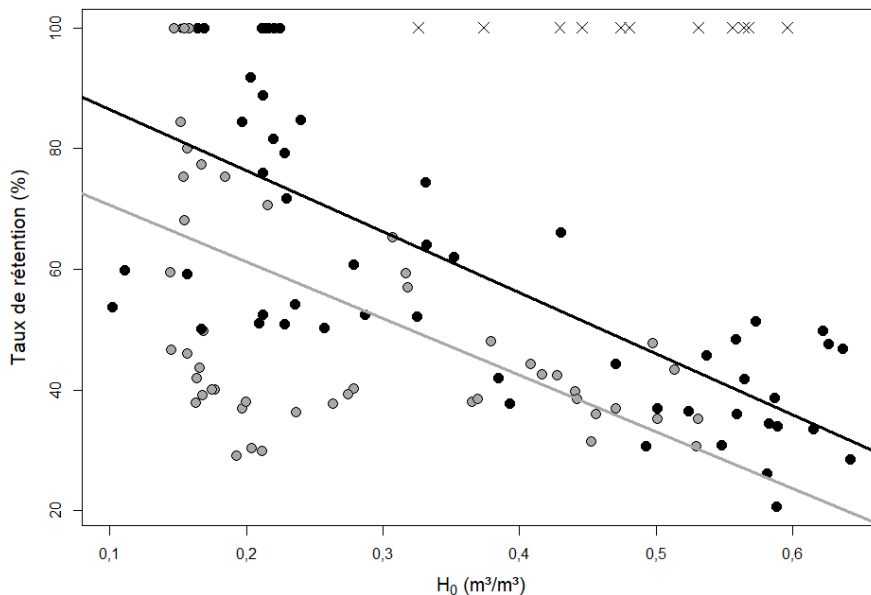


Figure 12 : Relation entre les taux de rétention mesurés dans les bacs munis de capteurs d'humidité et H_0 . Un point représente une mesure réalisée dans un bac. Les droites sont les droites de régression simple modélisant ces relations. **En gris** : mesures relatives au substrat Zinco. **En noir** : mesures relatives au substrat recyclé. Les croix représentent des données de la période allant du 19/05 au 21/05. Cette période est caractérisée par des précipitations très faibles, ce qui explique les taux de rétention élevés malgré le haut taux d'humidité observé dans les substrats. Ces mesures n'ont donc pas été prises en compte par les modèles de régression simple.

5.1.2 Influence de la végétation sur la capacité de rétention des bacs

En moyenne, les bacs contenant de la végétation ont un taux de rétention mensuel significativement supérieur aux taux de rétention mensuels mesurés dans leurs bacs analogues contenant du sol nu, peu importe le mois et le substrat (Tableau 6). De plus, ces différences sont significatives (tests *t* de Student à échantillon unique ; résultats consultables dans l'Annexe 4).

Tableau 6 : Taux de rétention mensuels mesurés dans les bacs contenant du sol nu lors de chaque mois et pour chaque substrat ainsi que les taux mensuels moyens calculés à partir des bacs contenant de la végétation pour chaque substrat.

Mai	Zinco	Sol nu	62,4 %
		Végétation	71,1 % ± 2,1 %
	Recyclé	Sol nu	67,5 %
		Végétation	74,7 % ± 2,3 %
Juin	Zinco	Sol nu	36,3 %
		Végétation	39,8 % ± 2,2 %
	Recyclé	Sol nu	42,5 %
		Végétation	49,5 % ± 2,2 %

5.1.3 Effet des traits fonctionnels et du couvert sur le taux de rétention - Mai

Substrat Zinco :

Deux variables explicatives du taux de rétention ont été sélectionnées par le modèle de régression multiple. Il s'agit du couvert et de la SLA. Aussi, 46,6 % de la variabilité du taux de rétention entre les bacs peut être expliquée par le modèle. Toutefois, l'analyse des p-valeurs relatives à chacune des variables retenues indique que seul le couvert a une influence significative sur la capacité de rétention des bacs (Tableau 7).

Tableau 7 : Résumé du modèle de régression ajusté mettant en relation le taux de rétention mensuel avec les variables liées à la végétation pour le mois de mai et pour le substrat Zinco.

Éléments retenus par le modèle	Coefficient estimé	P-valeur
Ordonnée à l'origine	64,00	< 0,001 ***
Couvert	0,20	0.005 **
SLA	0,023	0.20
Qualité du modèle		
R ² ajusté		0,466
Écart-type résiduel		3,38
Nombre d'observations		20

L'analyse des deux premiers axes de l'ACP montre une éventuelle colinéarité entre le couvert et la combinaison « Hauteur x Couvert » (Figure 13). L'ajustement d'une régression linéaire simple mettant en relation la combinaison « Hauteur x Couvert » avec le taux de rétention mensuel indique également une influence significative de cette variable sur le taux de rétention (coefficient estimé : 53,27 ; p-valeur = 0,047 * ; R² ajusté = 0,157).

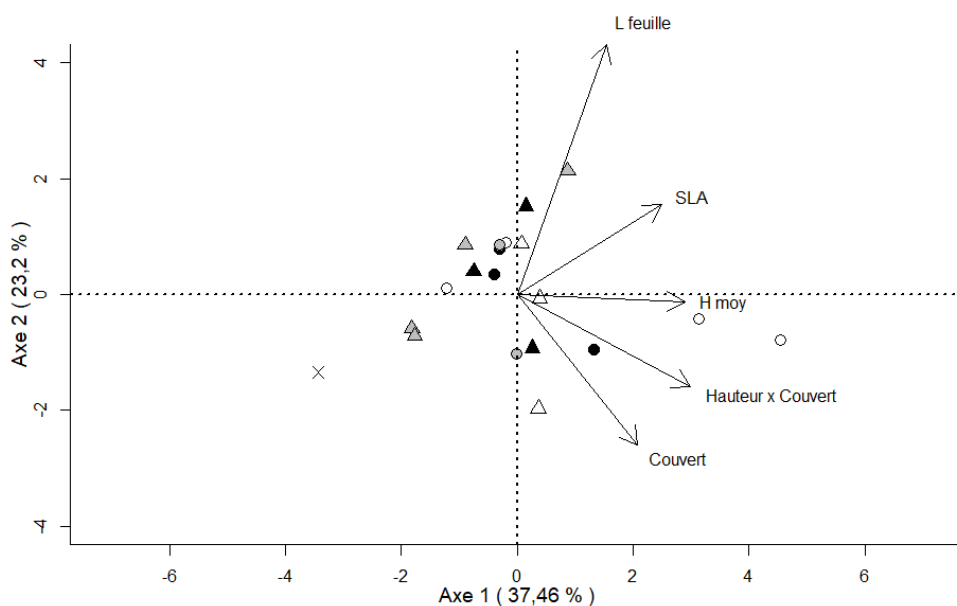


Figure 13 : Projection le long des axes 1 et 2 de l'ACP mettant en relation les différentes variables explicatives du taux de rétention mensuel mesurées dans les bacs contenant du substrat Zinco durant le mois de mai. **Triangles** : bacs contenant des espèces dont le système racinaire est pivotant ; **Points** : bacs contenant des espèces dont le système racinaire est fibreuse. **Blanc** : bacs contenant des espèces dont la pilosité foliaire est faible ; **Gris** : bacs contenant des espèces dont la pilosité foliaire est intermédiaire ; **Noir** : bacs contenant des espèces dont la pilosité foliaire est élevée. **La croix** correspond au bac contenant le sol nu.

En ce qui concerne les traits fonctionnels discontinus (architecture du système racinaire et pilosité foliaire), l'ACP ne montre pas de relation flagrante ceux-ci et les variables continues (Figure 13). L'architecture du système racinaire n'a pas d'influence significative sur la capacité de rétention des bacs (AV1 ; df = 1 ; F = 0,044 ; p-valeur = 0,836). Il en est de même pour la pilosité foliaire (AV1 ; df = 2 ; F = 0,42 ; p-valeur = 0,666).

Substrat recyclé :

Deux variables explicatives du taux de rétention ont été sélectionnés par le modèle de régression multiple. Il s'agit du couvert et de la combinaison « Hauteur x Couvert ». Aussi, 57,6 % de la variabilité du taux de rétention entre les bacs peut être expliquée par le modèle. Toutefois, l'analyse des p-valeurs relatives à chacune des deux variables indique que seul le couvert a une influence réellement significative sur la capacité de rétention des bacs (Tableau 8).

Tableau 8 : Résumé du modèle de régression ajusté mettant en relation le taux de rétention mensuel avec les variables liées à la végétation pour le mois de mai et pour le substrat recyclé.

Éléments retenus par le modèle	Coefficient estimé	P-valeur
Ordonnée à l'origine	67,80	< 0,001 ***
Couvert	0,18	0.003 **
Hauteur moyenne x Couvert	31,19	0.056
Qualité du modèle		
R ² ajusté		0,576
Écart-type résiduel		3,15
Nombre d'observations		20

L'analyse des deux premiers axes de l'ACP montre une éventuelle colinéarité entre le couvert et la SLA (Figure 14). L'ajustement d'une régression linéaire simple mettant en relation la SLA avec le taux de rétention mensuel indique également une influence significative de cette variable sur le taux de rétention (coefficient estimé : 0,064 ; p-valeur = **0,003 **** ; R^2 ajusté = 0,354).

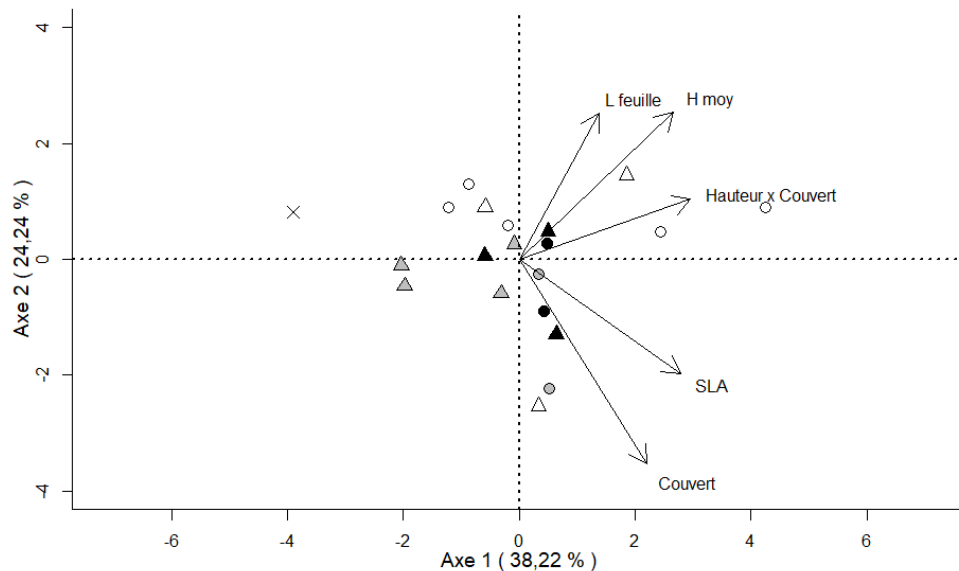


Figure 14 : Projection le long des axes 1 et 2 de l'ACP mettant en relation les différentes variables explicatives du taux de rétention mensuel mesurées dans les bacs contenant du substrat recyclé durant le mois de mai. **Triangles** : bacs contenant des espèces dont le système racinaire est pivotant ; **Points** : bacs contenant des espèces dont le système racinaire est fibreux. **Blanc** : bacs contenant des espèces dont la pilosité foliaire est faible ; **Gris** : bacs contenant des espèces dont la pilosité foliaire est intermédiaire ; **Noir** : bacs contenant des espèces dont la pilosité foliaire est élevée. **La croix** correspond au bac contenant le sol nu.

En ce qui concerne les traits fonctionnels discontinus, l'ACP ne montre pas de relation flagrante entre ceux-ci et les variables continues (Figure 14). L'architecture du système racinaire n'a pas d'influence significative sur la capacité de rétention des bacs (AV1 ; df = 1 ; F = 3,80 ; p-valeur = 0,070). Il en est de même pour la pilosité foliaire (AV1 ; df = 2 ; F = 0,061 ; p-valeur = 0,941).

5.1.4 Effet des traits fonctionnels et du couvert sur le taux de rétention - Juin

Substrat Zinco :

Quatre variables explicatives du taux de rétention ont été sélectionnées par le modèle de régression multiple. Il s'agit du couvert, de la biomasse souterraine sèche, de la combinaison « Hauteur x Couvert » et de la longueur de la plus grande feuille. Aussi, 80,6 % de la variabilité du taux de rétention entre les bacs peut être expliquée par le modèle. Toutefois, l'analyse des p-valeurs la longueur de la plus grande feuille n'a pas d'influence réellement significative sur la capacité de rétention des bacs (Tableau 9).

Aussi, les coefficients de régression multiple relatifs à la biomasse souterraine et à la combinaison « Hauteur x Couvert » estimés par le modèle sont négatifs (Tableau 9). Cependant, les coefficients de corrélation entre ces deux variables et le taux de rétention sont tous les deux positifs. De plus, en ce qui concerne la combinaison « Hauteurs x Couvert », le

coefficient de régression simple mettant en relation cette variable avec le taux de rétention est également positif (estimé à 34,44 ; p-valeur = **0,015 ***), ce qui signifie que son influence sur le taux de rétention est malgré tout bien positive. Concernant la biomasse souterraine, le coefficient de corrélation entre cette variable et le taux de rétention est tellement faible (0,06), que l'influence cette variable sur le taux de rétention peut tout simplement être négligé malgré le fait qu'elle ait été retenue par le modèle de régression multiple. Il est donc important de rester prudent lorsque de nombreuses variables sont intégrées dans un modèle de régression multiple et de bien vérifier la cohérence du modèle ajusté.

Tableau 9 : Résumé du modèle de régression ajusté mettant en relation le taux de rétention mensuel avec les variables liées à la végétation pour le mois de juin et pour le substrat Zinco.

Éléments retenus par le modèle	Coefficient estimé	P-valeur
Ordonnée à l'origine	34,9297	< 0,001 ***
Couvert	0.353	< 0,001 ***
Biomasse souterraine sèche	-0,040	0,007 **
Hauteur x Couvert	-40,225	0,005 **
Longueur de la plus grande feuille	0,180	0,121
Qualité du modèle		
R ² ajusté		0,806
Écart-type résiduel		1,977
Nombre d'observations		20

L'analyse des deux premiers axes de l'ACP laisse supposer que la hauteur moyenne et la biomasse aérienne sèche suivent une relation colinéaire avec le couvert (Figure 15- A).

L'ajustement d'une régression linéaire simple mettant en relation la biomasse aérienne sèche avec le taux de rétention mensuel indique que ce trait a également une influence significative sur la capacité de rétention du système (coefficient estimé : 0,076 ; p-valeur = **0,034 *** ; R² ajusté = 0,184).

Nous ne pouvons pas en dire autant en ce qui concerne la hauteur moyenne. En effet, aucun effet significatif de ce trait sur le taux de rétention n'a été détecté (régression linéaire simple). En réalité, l'analyse des axes 2 et 3 de l'ACP montre que la corrélation entre la hauteur moyenne et le couvert n'est pas aussi élevée que ce que les axes 1 et 2 pourraient laisser croire (Figure 15- B).

En ce qui concerne les traits fonctionnels discontinus, l'ACP ne montre pas de relation flagrante entre ceux-ci et les variables continues (Figure 15). L'architecture du système racinaire n'a pas d'influence significative sur la capacité de rétention des bacs (AV1 ; df = 1 ; F = 0,071 ; p-valeur = 0,795). Il en est de même pour la pilosité foliaire (AV1 ; df = 2 ; F = 1,310 ; p-valeur = 0,311).

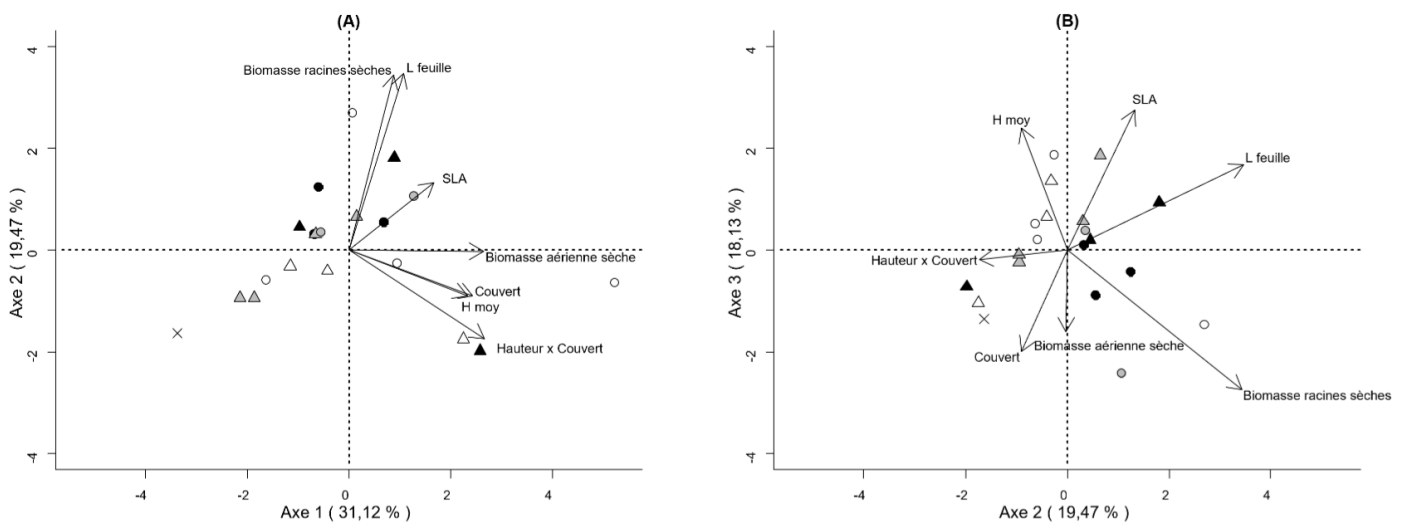


Figure 15 : Projection le long des axes 1 et 2 (A) et des axes 2 et 3 (B) de l'ACP mettant en relation les différentes variables explicatives du taux de rétention mensuel mesurées dans les bacs contenant du substrat Zincu durant le mois de juin. **Triangles** : bacs contenant des espèces dont le système racinaire est pivotant ; **Points** : bacs contenant des espèces dont le système racinaire est fibreux. **Blanc** : bacs contenant des espèces dont la pilosité foliaire est faible ; **Gris** : bacs contenant des espèces dont la pilosité foliaire est intermédiaire ; **Noir** : bacs contenant des espèces dont la pilosité foliaire est élevée ; **La croix** correspond au bac contenant le sol nu.

Substrat recyclé :

Deux variables explicatives du taux de rétention ont été sélectionnées par le modèle de régression multiple. Il s'agit de la combinaison « Hauteur x Couvert » et de la SLA. Aussi, 58,93 % de la variabilité du taux de rétention entre les bacs peut être expliquée par le modèle. Toutefois, l'analyse des p-valeurs relatives à chacun des deux traits indique que seule la combinaison « Hauteur x Couvert » a une influence réellement significative sur la capacité de rétention des bacs (Tableau 10).

Tableau 10 : Résumé du modèle de régression ajusté mettant en relation le taux de rétention mensuel avec les variables liées à la végétation pour le mois de juin et pour le substrat recyclé.

Éléments retenus par le modèle	Coefficient estimé	P-valeur
Ordonnée à l'origine	41,00	< 0,001 ***
Hauteur x Couvert	24,39	0,014 *
SLA	0,033	0,110
Qualité du modèle		
R ² ajusté		0,589
Écart-type résiduel		3,026
Nombre d'observations		20

L'analyse des axes 1 et 2, ainsi que des axes 2 et 3 de l'ACP montre une éventuelle colinéarité entre la hauteur moyenne et la combinaison « Hauteur x Couvert » (Figure 16 - A et Figure 16 - B). L'ajustement d'une régression linéaire simple mettant en relation la hauteur moyenne avec le taux de rétention mensuel indique également une influence significative de cette variable sur le taux de rétention (coefficient estimé : 0,142 ; p-valeur = 0,009 ** ; R² ajusté = 0,283).

Bien que l'analyse des axes 1 et 2 ou des axes 2 et 3 de l'ACP ne montre pas de colinéarité flagrante entre le couvert et la combinaison « Hauteur x Couvert », ou même avec la SLA⁴, le couvert a également une influence significative sur la capacité de rétention des bacs. En effet, une régression linéaire simple mettant en relation le couvert avec le taux de rétention mensuel mesuré dans les bacs permet d'affirmer cela (coefficient estimé : 0,150 ; p-valeur = **0,001 **** ; R² ajusté = 0,431).

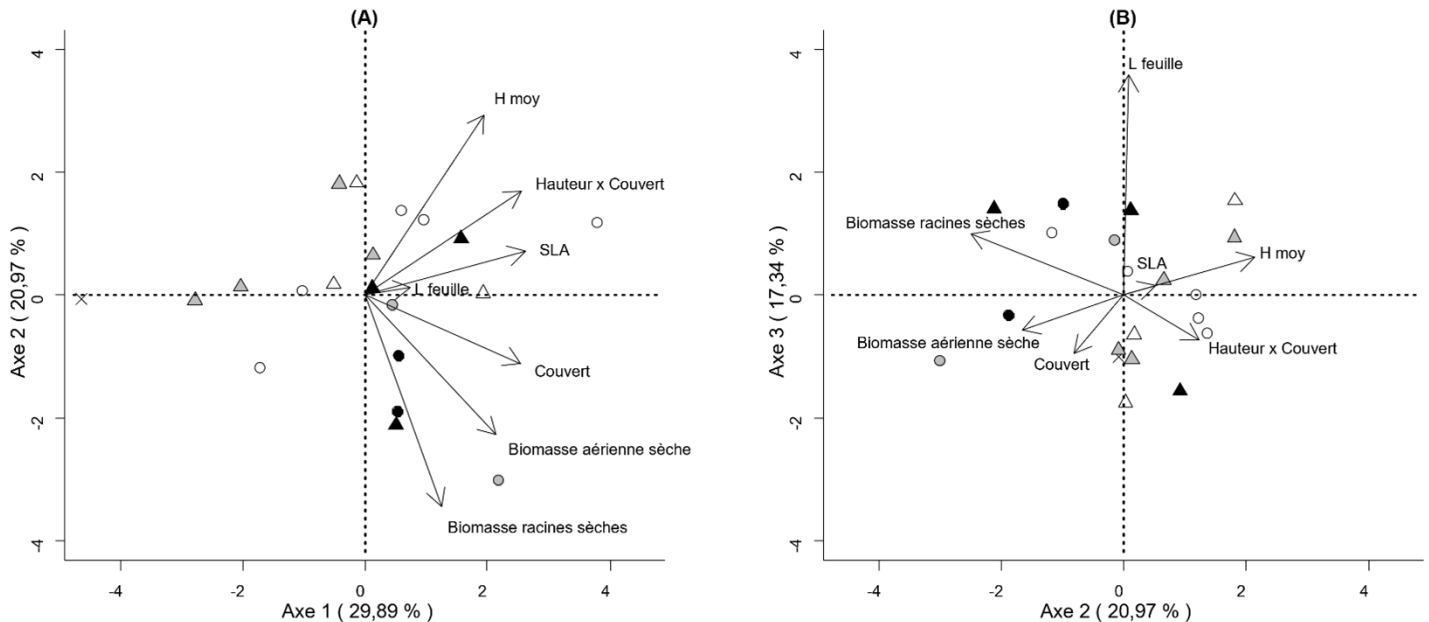


Figure 16 : Projection le long des axes 1 et 2 (A) et des axes 2 et 3 (B) de l'ACP mettant en relation les différentes variables explicatives du taux de rétention mensuel mesurées dans les bacs contenant du substrat Recyclé durant le mois de juin. **Triangles** : bacs contenant des espèces dont le système racinaire est pivotant ; **Points** : bacs contenant des espèces dont le système racinaire est fibreux. **Blanc** : bacs contenant des espèces dont la pilosité foliaire est faible ; **Gris** : bacs contenant des espèces dont la pilosité foliaire est intermédiaire ; **Noir** : bacs contenant des espèces dont la pilosité foliaire est élevée ; **La croix** correspond au bac contenant le sol nu.

En ce qui concerne les traits fonctionnels discontinus, l'ACP ne montre pas de relation flagrante entre ceux-ci et les variables continues (Figure 16). L'architecture du système racinaire n'a pas d'influence significative sur la capacité de rétention des bacs (AV1 ; df = 1 ; F = 2,124 ; p-valeur = 0,165). Il en est de même pour la pilosité foliaire (AV1 ; df = 2 ; F = 0,259 ; p-valeur = 0,777).

5.1.5 Effets individuels des variables les plus significatives

Le couvert et la combinaison « Hauteur x Couvert » sont les deux seuls traits fonctionnels ayant été retenus par chaque modèle de régression ajusté (Tableau 11).

Durant le mois de mai, les pentes des modèles de régression mettant en relation le couvert avec le taux de rétention mensuel mesuré dans les bacs sont similaires entre les deux substrats (Figure 17). Les coefficients de régression simple estimés en mai sont égaux à 0,226 pour le substrat Zinco (p-valeur < **0,001 *****) et à 0,223 pour le substrat recyclé (p-valeur < **0,001 *****).

⁴ C'est le problème des ACP. Bien que celles-ci donnent visuellement une idée des relations pouvant exister entre les variables, elles ne quantifient pas ces relations de manière stricte et peut parfois laisser passer certaines informations. Il est donc important de toujours observer les projections des axes de manière critique et de prendre du recul avant de tirer une quelconque conclusion.

Tableau 11 : Résumé des traits explicatifs du taux de rétention sélectionnés par les modèles de régression multiple mettant en relation ces traits avec le taux de rétention mensuel pour chaque mois et chaque substrat. En gras, les traits fonctionnels dont la p-valeur associée est inférieure à 0,05.

Mai	
Zinco	Recyclé
Couvert SLA Hauteur x Couvert	Couvert SLA Hauteur x Couvert
Juin	
Zinco	Recyclé
Couvert Hauteur x Couvert Biomasse aérienne sèche Longueur de la plus grande feuille	Couvert Hauteur x Couvert SLA Hauteur

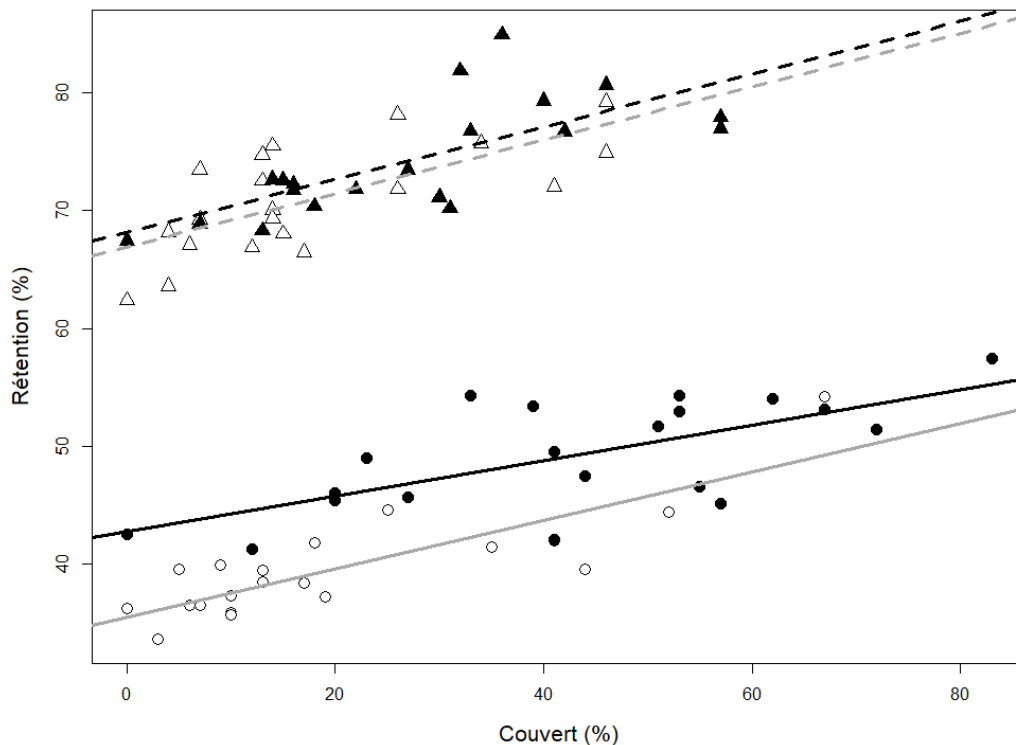


Figure 17 : relation entre le taux de rétention mensuel et le couvert mesurés dans chaque bac (un point = un bac). **Triangles** : données prises durant le mois de mai ; **Points** : données prises durant le mois de juin ; **Blanc** : données relatives au substrat Zinco ; **Noir** : données relatives au substrat recyclé. Les droites de régression ont été ajoutées au graphique. **En pointillé** : droites relatives au mois de mai ; **En trait plein** : droites relatives au mois de juin. **Droites grisées** : droites relatives au substrat Zinco ; **Droites noires** : droites relatives au substrat recyclé.

En juin, les bacs contenant le substrat recyclé semblent moins sensibles au couvert que les bacs contenant le substrat Zinco qui, eux, se comportent de manière assez semblable au mois de mai (Figure 17). Les coefficients de régression simple estimés en juin sont égaux à 0,206 ($p < 0,001$ ***) pour le substrat Zinco et à 0,150 pour le substrat recyclé ($p = 0,001$ **). Cependant, statistiquement, ces coefficients de régression ne diffèrent pas significativement (ancova, pour l'interaction Substrat x Couvert : $df = 1$; $F = 1,17$; p -valeur = 0,288). Les pente

de ces droites ne varie également pas significativement selon le mois (ancova, pour l'interaction Mois x Couvert : $df = 1$; $F \approx 0,00$; p -valeur = 0,999).

En mai, les pentes des modèles de régression mettant en relation la combinaison « Hauteur x Couvert » avec la rétention d'eau au sein des bacs sont elles aussi similaires entre les deux substrats (Figure 18). Les coefficients de régression simple sont égaux à 53,265 pour le substrat Zinco ($p = 0,047 *$) et à 54,34 pour le substrat recyclé ($p = 0,006 **$).

En juin, les pentes de ces mêmes droites de régression sont plus prononcées qu'en mai (Figure 18). Cependant, statistiquement, ces pentes ne diffèrent pas significativement entre elles en fonction du mois (ancova, pour l'interaction Mois x « Hauteur x Couvert » : $df = 1$; $F = 0,373$; p -valeur = 0,543). De plus, les relations entre ces deux variables sont toujours relativement similaires entre les deux substrats durant le mois de juin. Les coefficients de régression simple estimés durant ce mois-ci sont égaux à 34,44 ($p = 0,015 *$) pour le substrat Zinco et à 34,22 pour le substrat recyclé (p -valeur < $0,001 ***$).

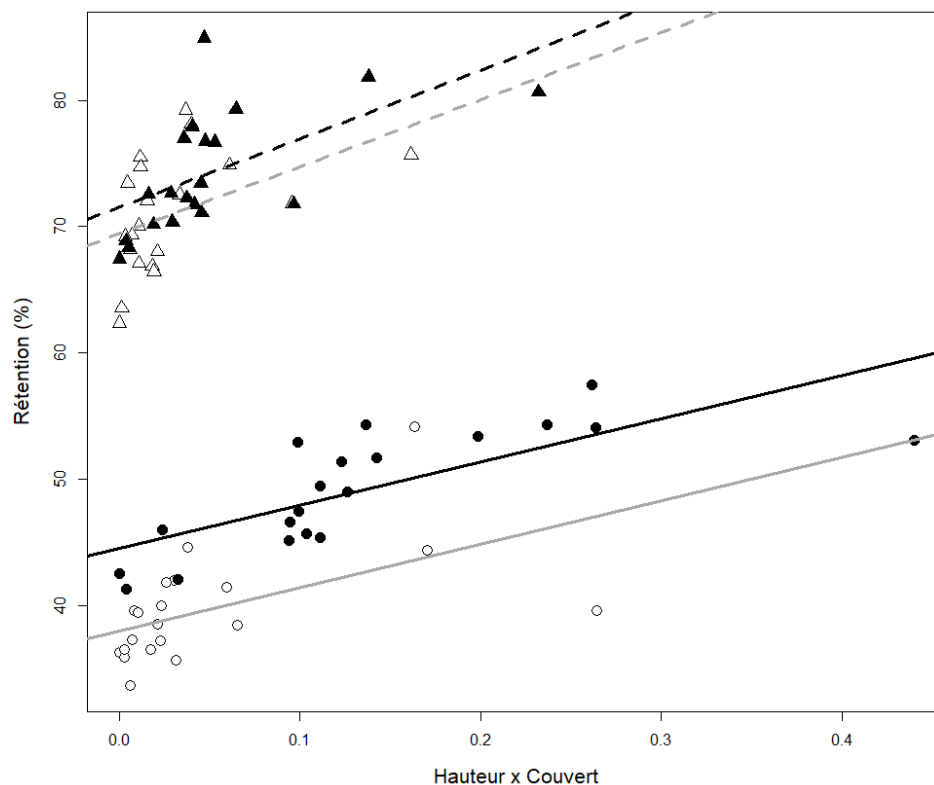


Figure 18 : relation entre le taux de rétention mensuel et la combinaison Hauteur x Couvert mesurés dans chaque bac (un point = un bac). **Triangles** : données prises durant le mois de mai ; **Points** : données prises durant le mois de juin ; **Blanc** : données relatives au substrat Zinco ; **Noir** : données relatives au substrat recyclé. Les droites de régression ont été ajoutées au graphique. **En pointillé** : droites relatives au mois de mai ; **En trait plein** : droites relatives au mois de juin ; **Droites grisées** : droites relatives au substrat Zinco ; **Droites noires** : droites relatives au substrat recyclé.

5.2 Détention

5.2.1 Comparaison des deux substrats

L'averse suivie a duré environ 20 minutes sans interruption. Le pic d'intensité a été atteint après 15 minutes (depuis le début de l'averse) et est caractérisé par une intensité de 4,57 mm/h. La hauteur d'eau totale précipitée sur la durée de l'averse s'élève à 1,27 mm.

Le taux d'humidité moyen mesuré au départ de l'averse était de 0,48 m³/m³ dans le substrat Zinco et de 0,58 m³/m³ dans le substrat recyclé.

De manière générale, le débit sortant des bacs (ou le débit d'écoulement) était faible en comparaison avec le débit entrant (ou l'intensité de l'averse) (Figure 19). Le pic d'écoulement moyen mesuré dans les bacs contenant le substrat Zinco est caractérisé par un débit de 0,36 mm/h \pm 0,03 mm/h contre 0,51 mm/h \pm 0,04 mm/h pour le substrat recyclé.

La moyenne du taux d'atténuation mesuré dans les différents bacs contenant le substrat Zinco équivaut à 92,1 % \pm 0,7 % contre 88,8 % \pm 0,8 % pour le substrat recyclé. Cette différence entre les deux substrats est significative (test *t* de comparaison de deux moyennes de Welch, les résultats du test peuvent être consultés dans l'Annexe 5).

En ce qui concerne le décalage moyen entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations, celui-ci correspond à 45 minutes \pm 4 minutes pour le substrat Zinco contre 31 minutes \pm 4 minutes pour le substrat recyclé. Cette différence est significative (test *t* de comparaison de deux moyennes de Welch, les résultats du test peuvent être consultés dans l'Annexe 5).

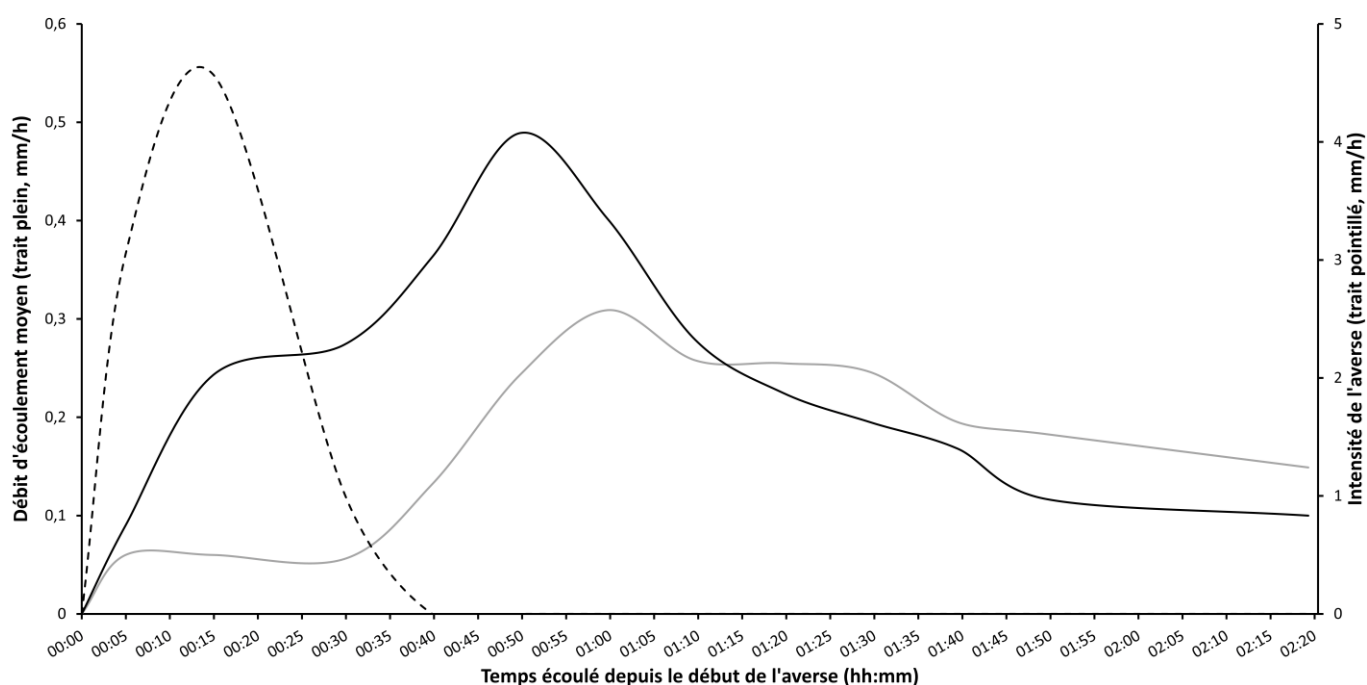


Figure 19 : **En gris** : évolution au cours du temps de la moyenne du débit d'écoulement à travers les bacs en réponse à l'averse suivie dans le substrat Zinco. **En noir** : évolution au cours du temps de la moyenne du débit d'écoulement à travers les bacs en réponse à l'averse suivie dans le substrat Recyclé. **En trait pointillé** : évolution au cours du temps de l'intensité de l'averse.

5.2.2 Effet de la végétation sur le taux d'atténuation du pic d'écoulement

En ce qui concerne le substrat Zinco, le taux d'atténuation mesuré dans les bacs contenant de la végétation est en moyenne supérieur au même taux mesuré dans leur bac analogue contenant le sol nu (Tableau 12). Cette différence est significative (test *t* de Student à échantillon unique, résultats consultables dans l'Annexe 6). Il en est de même pour ce qui concerne le substrat recyclé (test *t* de Student à échantillon unique, résultats consultables dans l'Annexe 6)

Tableau 12 : Taux d'atténuation du pic d'écoulement mesurés dans les bacs contenant du sol nu pour chaque substrat ainsi que les taux d'atténuation moyens calculés à partir des bacs contenant de la végétation pour chaque substrat.

Zinco	Sol nu	89,5 %
	Végétation	92,3 % ± 0,6 %
Recyclé	Sol nu	86,9 %
	Végétation	88,9 % ± 0,8 %

5.2.2.1 Effet des traits fonctionnels et du couvert sur le taux d'atténuation du pic de débit d'écoulement

Substrat Zinco :

Une seule variable explicative du taux de rétention a été sélectionnée par le modèle de régression multiple. Il s'agit de la surface foliaire spécifique (SLA). Toutefois, l'analyse de la *p*-valeur relative à ce trait indique que l'influence de cette variable n'est pas significative (Tableau 13).

Tableau 13 : Résumé du modèle de régression ajusté mettant en relation le taux d'atténuation du pic d'écoulement avec les variables liées à la végétation pour le substrat Zinco.

Éléments retenus par le modèle	Coefficient estimé	P-valeur
Ordonnée à l'origine	90,32	< 0,001 ***
SLA	0,012	0,067
Qualité du modèle		
R ² ajusté		0,129
Écart-type résiduel		1,318
Nombre d'observations		20

En ce qui concerne les traits fonctionnels discontinus, ni l'architecture du système racinaire (AV1 ; *df* = 1 ; *F* = 0,632 ; *p*-valeur = 0,440), ni la pilosité (AV1 ; *df* = 2 ; *F* = 1,204 ; *p*-valeur = 0,353) n'ont d'influence significative sur le taux d'atténuation du pic d'écoulement à travers les bacs.

Substrat recyclé :

Le modèle de régression multiple n'a sélectionné aucune variable ayant un effet significatif sur le taux d'atténuation du pic d'écoulement dans ce substrat.

En ce qui concerne les traits fonctionnels discontinus, ni l'architecture du système racinaire (AV1 ; *df* = 1 ; *F* = 0,008 ; *p*-valeur = 0,930), ni la pilosité (AV1 ; *df* = 2 ; *F* = 0,420 ; *p*-valeur =

0,670) n'ont d'influence significative sur le taux d'atténuation du pic d'écoulement à travers les bacs.

5.2.3 Effet de la végétation sur le délai entre le pic de débit d'écoulement et le pic de précipitations

En ce qui concerne le substrat Zinco, le délai mesuré dans les bacs contenant de la végétation est en moyenne supérieur au délai mesuré dans le bac contenant du sol nu (Tableau 14). Cette différence est significative (test t de Student à échantillon unique, les résultats de ce test sont consultables en Annexe 7).

Dans le substrat recyclé, ce délai est inférieur en moyenne dans les bacs contenant de la végétation. Toutefois, cette différence n'est pas significative malgré tout (test t de Student à échantillon unique, les résultats de ce test sont consultables en Annexe 7).

Tableau 14 : Décalages temporels entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations mesurés dans les bacs contenant du sol nu pour chaque substrat ainsi que les décalages moyens calculés à partir des bacs contenant de la végétation pour chaque substrat.

Zinco	Sol nu	35 minutes
	Végétation	46 minutes ± 4 minutes
Recyclé	Sol nu	35 minutes
	Végétation	31 minutes ± 5 minutes

5.2.3.1 Effet des traits fonctionnels et du couvert sur le délai entre le pic de débit d'écoulement et le pic de précipitations

Substrat Zinco :

Deux variables explicatives du délai entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations ont été sélectionnées par le modèle de régression multiple. Il s'agit du couvert et de la combinaison « Hauteur x Couvert ». Toutefois, l'analyse des p-valeurs montre que seul le couvert a une influence significative sur la variable à expliquer. Aussi, 36,1 % de la variabilité du délai mesuré dans les bacs contenant ce substrat peut être expliquée par la variation de ces variables (Tableau 15).

Tableau 15 : Résumé du modèle de régression ajusté mettant en relation décalage temporel entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations avec les variables liées à la végétation pour le substrat Zinco.

Éléments retenus par le modèle	Coefficient estimé	P-valeur
Ordonnée à l'origine	37,86	< 0,001 ***
Couvert	0,51	0,0028 **
Hauteur x Couvert	-0,007	0,19
Qualité du modèle		
R ² ajusté		0,361
Écart-type résiduel		7,33
Nombre d'observations		20

En ce qui concerne les traits fonctionnels discontinus, ni l'architecture du système racinaire (AV1 ; $df = 1$; $F = 0,137$; p -valeur = 0,716), ni la pilosité (AV1 ; $df = 2$; $F = 0,442$; p -valeur = 0,657) n'ont d'influence significative sur le retard entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations.

Substrat recyclé :

Dans ce substrat, le modèle de régression multiple n'a sélectionné aucune variable ayant un effet significatif sur le délai entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations.

En ce qui concerne les traits fonctionnels discontinus, ni l'architecture du système racinaire (AV1 ; degré de liberté = 1 ; $F = 0,001$; p -valeur = 0,981), ni la pilosité (AV1 ; $df = 2$; $F = 0,652$; p -valeur = 0,552) n'ont d'influence significative sur le retard entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations.

6 Discussion

6.1 Capacité de rétention

6.1.1 Influence des précipitations et de la teneur en eau du substrat sur la capacité de rétention des bacs

La différence flagrante entre les taux de rétention mensuels mesurés en mai et en juin s'explique par la quantité totale d'eau précipitée sensiblement plus importante en juin (plus du double). De plus, les précipitations du mois de juin ont été principalement caractérisées par de violents orages s'étalant sur de courtes durées. Citons par exemple les précipitations du 02 juin où 29,2 mm d'eau ont été précipités entre 20h30 et 00h00, ou bien celles du 18 juin où il est tombé 24,6 mm d'eau entre 03h00 et 04h00. De telles intensités de précipitations font que le point de saturation du substrat des bacs a été atteint rapidement, ce qui a accentué l'écoulement de l'eau à travers ceux-ci (Czemiel Berndtsson, 2010; Nawaz et al., 2015).

Nawaz et al. (2015), avaient déjà observé que la quantité d'eau écoulée à travers les toitures vertes lors d'un épisode de précipitations était élevée lorsque la hauteur d'eau précipitée l'était également. Ce même phénomène a été observé au cours de cette expérimentation puisque nous avons pu mettre en évidence l'effet négatif et très hautement significatif de la quantité d'eau précipitée sur la capacité de rétention des bacs (pour une même période). Une telle différence de pluviosité observée entre ces deux mois explique donc la différence élevée en moyenne entre les taux de rétention mensuels mesurés lors de chaque mois.

Aussi, Moran et al. (2003), avaient également observé que la teneur en eau initialement présente dans le substrat au départ d'une pluie influençait négativement la quantité d'eau retenue au cours de celles-ci. Nous avons également pu observer ce phénomène. En effet, à plus petite échelle temporelle, et donc à niveau de résolution plus élevé, nous avons pu mettre en évidence l'influence négative et très hautement significative qu'avait le taux d'humidité du substrat sur la capacité de rétention des bacs. De plus, étant donné que le taux d'humidité du substrat fluctue principalement en réponse aux variables météorologiques telles que la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent, ou encore le rayonnement solaire (Allen et al., 2006; Martínez et al., 2014), cela confirme que c'est également via une interaction

étroite avec le substrat que le climat général influe sur la capacité de rétention des toitures vertes.

6.1.2 Comparaison des substrats

Nous avons pu observer durant l'expérimentation que le taux d'humidité présent dans le substrat recyclé était toujours supérieur au taux observé dans le substrat Zinco. Cela peut expliquer pourquoi le substrat recyclé offre une meilleure capacité de rétention au système, puisque celui-ci est capable de contenir une plus grande quantité d'eau dans ses pores. Cette meilleure capacité de rétention de la part des bacs contenant le substrat recyclé peut être due à la teneur plus importante en matière organique au sein de celui-ci, étant donné que l'augmentation de la quantité de matière organique dans le sol améliore sa capacité de rétention (Celik et al., 2004; Edwards et al., 2000; Rawls et al., 2003).

Toutefois, les résultats obtenus montrent que, dans le cadre de cette expérimentation, la manière dont le taux de rétention mesuré dans les bacs varie en fonction de la quantité d'eau précipitée et du taux d'humidité du substrat observé au départ d'un épisode de précipitations est la même selon le substrat utilisé.

Dans certains cas, le substrat recyclé retient même trop bien l'eau dans ses pores. En effet, ce substrat s'assèche généralement plus lentement que le substrat Zinco. Par conséquent, lorsque le délai entre deux épisodes de précipitations est court et/ou lorsque les conditions climatiques ne sont pas favorables au processus d'évapotranspiration, le substrat recyclé peut avoir du mal à évacuer suffisamment le stock d'eau retenu en son sein lors du premier épisode avant que ne débute l'épisode suivant. Cela réduira donc la quantité d'eau pouvant être retenue au cours de ce second épisode par le substrat recyclé. Le substrat Zinco étant beaucoup moins affecté par ce phénomène, sa capacité de rétention est donc également moins affectée lorsque de telles conditions climatiques surviennent.

Ce phénomène a pu être observé durant la seconde moitié du mois de mai. En effet, durant cette période, les précipitations, bien que pas forcément intenses, étaient très fréquentes (il a plu presque tous les jours entre le 12 mai et le 27 mai). De plus, une température moyenne de l'air de $11,5\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$, un taux d'humidité moyen de l'air de $78,9\% \pm 0,6\%$, une vitesse du vent moyenne de $2,4\text{ km/h} \pm 0,2\text{ km/h}$, ainsi qu'un indice UV n'atteignant que très rarement 3, ont été mesurés durant cette même période. Ces conditions ont donc fait que le substrat recyclé a maintenu presque constamment un taux d'humidité proche de sa capacité au champ, contrairement au mois de juin où la fréquence des précipitations, ainsi que les conditions climatiques souvent chaudes et sèches entre les différentes pluies, ont laissé au substrat recyclé le temps d'évacuer le stock d'eau au sein de ses pores par évaporation à plusieurs reprises. Stovin et al. (2013) avaient également observé durant une étude que les toitures vertes avaient une moindre capacité de rétention lorsque les précipitations étaient précédées par des conditions météorologiques humides.

Les précipitations intenses du mois de juin ont bien plus impacté la capacité de rétention des bacs que la différence de vitesse d'assèchement entre les deux substrats. Toutefois, cette différence de vitesse explique pourquoi la différence entre le taux de rétention mensuel moyen observé entre le substrat recyclé et le substrat Zinco est moins significative en mai par rapport au mois de juin.

Pour résumer, nous pouvons donc dire sur base des résultats obtenus que le substrat recyclé offre une meilleure capacité de rétention au système, sans pour autant influencer la relation qu'entretient cette même capacité de rétention avec la teneur en eau initiale du substrat au départ des précipitations, ainsi qu'avec l'intensité des précipitations. Par contre, l'interaction entre le substrat recyclé et les différentes variables météorologiques est très différente de l'interaction entre le substrat Zinco et ces mêmes variables. Par conséquent, la manière dont varie la capacité de rétention du système indirectement en réponse à la variation des différentes variables météorologiques peut donc être malgré tout très différente selon la composition du substrat.

6.1.3 Influence de la végétation sur la capacité de rétention des bacs

Indépendamment du type de substrat utilisé, la présence de végétation au sein des bacs améliore leur capacité de rétention de manière générale.

Durant tout le déroulement l'expérimentation, le rôle joué par le couvert végétal dans la variation de la capacité de rétention des bacs a été bien plus important que le rôle joué par la plupart des traits fonctionnels mesurés et ce, peu importe le substrat utilisé. L'influence du couvert végétal sur la capacité de rétention des toitures vertes (Nagase & Dunnett, 2012), voire sur la capacité d'interception directe d'un écosystème en général (Huber & Iroumé, 2001) avait déjà pu être mise en évidence auparavant. Cependant, une influence aussi importante en comparaison avec les autres caractéristiques de la végétation n'avait pas encore été observée jusqu'à maintenant au cours d'une étude de ce type.

Cette influence très importante du couvert s'explique par un état de développement de la végétation qui n'était pas homogène entre les différents bacs durant l'expérimentation. En effet, en raison du court délai entre la plantation des individus et la récolte des données, ainsi que des conditions abiotiques non optimales ayant affecté plus fortement certaines espèces que d'autres, le développement horizontal de la végétation a varié de manière importante entre les bacs.

Il sera donc intéressant de suivre le dispositif à plus long terme afin de vérifier si, dans les bacs au sein desquels la végétation est parvenue à s'installer durablement, les autres traits fonctionnels pourraient avoir ou non un rôle plus important dans la variation de la capacité de rétention du système lorsque le développement de la végétation se stabilisera, et donc lorsque le couvert sera moins hétérogène entre ces bacs.

Dans une moindre mesure, la combinaison du couvert et de la hauteur des individus a également une influence relativement importante sur la capacité de rétention mesurée dans les bacs, peu importe le mois et le substrat. Étant donné la très faible influence de la hauteur de la végétation sur la capacité de rétention du système, nous pouvons dire qu'une hauteur élevée de la végétation n'affecte positivement la capacité de rétention du système que si celle-ci est couplée à un couvert végétal également élevé.

Nous pouvons dire, sur base des résultats obtenus, que ce sont les caractéristiques de la végétation liées à l'occupation de l'espace par celle-ci qui jouent le rôle le plus important dans la capacité de rétention du système. La végétation influence donc sur la capacité de rétention d'une toiture verte principalement par l'intermédiaire du processus d'interception des

précipitations. Nous pouvons également dire que l'aptitude d'une espèce à croître horizontalement au sein d'une toiture verte est un critère important à prendre en compte en vue d'optimiser la capacité de rétention d'une toiture verte. Cette conclusion concorde avec les résultats obtenus par Nagase & Dunnett (2012) mettant en évidence l'importance entre autres du rôle du couvert et de la hauteur de la végétation sur la capacité de rétention des toitures vertes, ainsi que la nécessité de couvrir une surface importante de la toiture verte par de la végétation lorsque le rôle désiré de la toiture est d'optimiser sa performance hydrique.

En juin, le couvert mesuré dans le bac contenant le substrat Zinco et l'espèce *Lotus corniculatus* était extrêmement élevé en comparaison avec les autres bacs contenant ce substrat durant ce mois. En effet, le couvert mesuré dans ce bac était de 67 %, le troisième quartile de la distribution du couvert mesuré dans les bacs contenant le substrat Zinco étant égal à 27,5 % en juin. Cela explique donc pourquoi le taux de rétention mesuré dans ce bac était à son tour très élevé (54,1 %, le troisième quartile de la distribution du taux de rétention mesuré en juin dans ce substrat étant égal à 41,5 %).

Notons également qu'en mai et dans le substrat recyclé, le modèle de régression multiple a indiqué une influence significative de la SLA. Ce trait influence indirectement (via le processus d'évapotranspiration) le prélèvement de l'eau dans le substrat (Volder & Dvorak, 2014; G. C. Wright et al., 1993). Il est difficile d'expliquer les raisons de cette influence significative dans cette situation précise. En effet, la variabilité du couvert étant toujours assez élevée entre les bacs durant ce mois et dans ce substrat (écart type de 15,7 %), c'est cette variation du couvert qui explique principalement la variation entre les bacs du taux de rétention. De plus, nous avons déjà mentionné que durant cette période, les conditions climatiques étaient peu favorables au processus d'évapotranspiration.

Aussi, lorsque la biomasse aérienne a été intégrée aux modèles du mois de juin, une influence significative de cette variable sur le taux de rétention mesuré dans les bacs contenant le substrat Zinco a été observée, mais pas dans le recyclé. Dans ce cas-ci aussi, la variabilité du couvert était également très élevée (écart type de 18,2 %). Encore une fois, il est difficile d'expliquer pourquoi cette influence significative de la part de cette variable sur le taux de rétention a été observée dans le substrat Zinco et non dans le substrat recyclé.

Quoi qu'il en soit, cela prouve qu'une observation plus approfondie des traits fonctionnels moins influents à première vue mérite d'être réalisée malgré tout.

Enfin, le rôle très important que joue le couvert dans la capacité de rétention du système peut également expliquer pourquoi les bacs munis du substrat recyclé ont une capacité de rétention supérieure aux bacs contenant le substrat Zinco. En effet, tant durant le mois de mai que durant le mois de juin, le développement de la végétation, et donc l'intensité du couvert également, étaient largement supérieurs en moyenne dans le substrat recyclé (couvert de $27,6 \% \pm 7,4 \%$ contre $18,0 \% \pm 6,6 \%$ en mai et $42,7 \% \pm 10,0 \%$ contre $20,2 \% \pm 8,6 \%$ en juin). La différence de couvert observée entre ces deux substrats étant beaucoup plus importante en juin qu'en mai, cela peut également expliquer pourquoi la différence entre les taux de rétention mesurés en juin est beaucoup plus significative qu'en mai. Toutefois, le fait que le taux de rétention mesuré dans les bacs contenant le sol nu soit également toujours supérieur dans le recyclé ($67,5 \%$ contre $62,4 \%$ dans le Zinco en mai et $42,5 \%$ contre $36,3 \%$ dans le Zinco en juin) ainsi que la teneur en eau toujours supérieure dans le substrat recyclé indiquent

que le substrat utilisé joue malgré tout un rôle important dans la capacité de rétention du système. Ainsi, la meilleure capacité de rétention des bacs contenant le substrat recyclé semble bien être due à la fois au meilleur développement de la végétation au sein de ce substrat ainsi qu'à la meilleure capacité de rétention de ce substrat en général, et n'est donc pas due exclusivement à l'un ou à l'autre.

6.2 Capacité de détention

6.2.1 Comparaison des substrats

Durant l'averse suivie, tant le taux d'atténuation du pic de débit d'écoulement que le délai entre ce même pic et le pic de précipitations ont été significativement supérieurs dans le substrat Zinco.

Cette meilleure performance de la part du substrat Zinco s'explique probablement par les conditions climatiques observées au moment de l'averse suivie. En effet, pour rappel, la période durant laquelle l'averse a été suivie a été caractérisée par des conditions d'humidité importantes (5.2.1), et nous avons déjà mentionné les difficultés que pouvait avoir le substrat recyclé à évacuer l'eau stockée dans ses pores dans de telles conditions. Le substrat recyclé devait donc être en moyenne plus proche de sa capacité au champ au départ de l'averse que le substrat Zinco.

6.2.2 Influence de la végétation sur la capacité de rétention des bacs

De manière générale, la présence de végétation améliore en moyenne le taux d'atténuation du pic d'écoulement mesuré dans les bacs et ce, dans les deux substrats. Toutefois, aucun trait fonctionnel ni aucune autre variable caractérisant la végétation n'explique de manière significative la variation du taux d'atténuation du pic entre les bacs et ce, peu importe le substrat.

En ce qui concerne le délai entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations, seule la végétation se développant dans les bacs munis du substrat Zinco augmente significativement ce délai. Et dans cette situation, seule la variation du couvert explique de manière significative la variation de ce délai entre les bacs. Dans le substrat recyclé, la végétation de manière générale n'améliore pas ce délai. Les variables caractérisant cette végétation n'influent pas non plus significativement sur la variation de ce délai entre les bacs. Il est donc possible que la présence de végétation ne soit pas suffisante que pour compenser la mauvaise performance du substrat recyclé dans ces conditions précises.

Notons toutefois que les résultats obtenus nous informent sur le comportement des bacs à un moment précis de l'expérimentation, et donc sous des conditions météorologiques également bien précises. Il n'est pas impossible que le comportement des bacs soit très différent dans d'autres conditions. Par exemple, le dispositif ne nous a malheureusement pas permis de suivre un orage intense durant l'expérimentation. Mais il est fort probable que le taux d'atténuation du pic d'écoulement ainsi que le délai entre ce pic et le pic de précipitations mesurés dans les bacs ne soient pas aussi élevés dans de telles conditions par rapport aux valeurs que nous avons mesurées au cours de l'averse suivie (qui, elle, était d'intensité modérée).

7 Conclusion générale

De manière générale, cette expérimentation a permis de mettre en évidence que tant le substrat que la végétation jouent un rôle dans la performance hydrique des toitures vertes.

Le substrat fait de matériau recyclé, réalisé par nos soins, contribue à l'amélioration de la capacité de rétention des toitures vertes. La plus-value apportée par ce substrat est la plus intéressante lors d'épisodes de précipitations très intenses précédés par de longues périodes chaudes et sèches (durée de quelques jours), ce qui risque d'être plus fréquent à l'avenir suite aux changements climatiques (IPCC, 2014).

Au plus l'occupation de l'espace par la végétation sera important, et au plus la capacité de rétention du système le sera également. Ainsi, dans une optique d'optimisation de la capacité de rétention d'une toiture verte, les espèces capables de développer leurs organes aériens de manière importante et ce, malgré les conditions abiotiques imposées par la toiture, seront donc à privilégier, tout en préférant les espèces ayant une forte croissance horizontale.

Lorsque les conditions d'humidité sont importantes, la capacité de détention d'une toiture vertes lors de précipitations d'intensité modérée est meilleure lorsqu'elle est munie du substrat Zinco plutôt que du substrat recyclé. La végétation apporte une légère plus-value à cette capacité de détention (cette plus-value est également plus intéressante lorsque le système est muni du substrat Zinco). Toutefois, la variation des caractéristiques relatives à cette végétation n'influence que très peu la capacité de détention du système, hormis la variation du couvert qui a une influence sur le délai entre le pic d'écoulement à travers le système et le pic de précipitations lorsque le substrat Zinco est utilisé.

En terme de perspectives, un suivi sur le plus long terme du dispositif permettrait d'observer comment la variation des autres traits fonctionnels influencerait la variation de la capacité de rétention d'une toiture verte lorsque le couvert végétal sera moins hétérogène entre les bacs.

Aussi, en, raison du rôle très important que jouent les variables météorologiques dans le service de régulation des flux hydriques rendu par les toitures, l'extension de cette expérimentation à d'autres périodes de l'année permettrait d'élargir nos connaissances en ce qui concerne le comportement d'une toiture verte lorsque celle-ci est soumise à d'autres conditions météorologiques.

Enfin, le suivi à l'avenir du comportement du dispositif durant des averses d'intensité élevée permettrait et de mieux connaître les interactions entre la structure de la toiture verte et sa capacité de détention dans de telles conditions.

8 Bibliographie

- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Wright, J. L., Howell, T. A., Ventura, F., Snyder, R., Itenfisu, D., Steduto, P., Berengena, J., Yrisarry, J. B., Smith, M., Pereira, L. S., Raes, D., Perrier, A., Alves, I., Walter, I., & Elliott, R. (2006). A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, *81*(1–2), 1–22.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>
- Arnold, C. L., & Gibbons, C. J. (1996). Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator. *Journal of the American Planning Association*, *62*(2), 243–258.
<https://doi.org/10.1080/01944369608975688>
- Baldocchi, D. D., Verma, S. B., Rosenberg, N. J., Blad, B. L., Garay, A., & Specht, J. E. (1983). Leaf Pubescence Effects on the Mass and Energy Exchange Between Soybean Canopies and the Atmosphere 1. *Agronomy Journal*, *75*(3), 537–543.
<https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500030028x>
- Barnes, K. B., Morgan, J. M., & Roberge, M. C. (2002). *Impervious Surfaces and the Quality of Natural and Built Environments*. Department of Geography and Environmental Planning, Towson University.
- Bates, A. J., Sadler, J. P., Greswell, R. B., & Mackay, R. (2015). Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: A six year experiment. *Landscape and Urban Planning*, *135*, 22–31.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.010>
- Belmonte Serrato, F., & Romero Diaz, A. (1998). A simple technique for measuring rainfall interception by small shrub: “interception flow collection box.” *Hydrological Processes*, *12*(3), 471–481. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19980315\)12:3<471::AID-HYP586>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19980315)12:3<471::AID-HYP586>3.0.CO;2-E)
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. H., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, *115*, 411–428.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Brandão, C., Cameira, M. do R., Valente, F., Cruz de Carvalho, R., & Paço, T. A. (2017). Wet season hydrological performance of green roofs using native species under Mediterranean climate. *Ecological Engineering*, *102*, 596–611.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.025>
- Brenneisen, S. (2003). The benefits of biodiversity from green roofs - Key design consequences. *Greening Rooftops for Sustainable Communities, First North American Green Roof Infrastructure Conference*.
- Buccola, N., & Spolek, G. (2011). A Pilot-Scale Evaluation of Greenroof Runoff Retention, Detention, and Quality. *Water, Air, & Soil Pollution*, *216*(1–4), 83–92.
<https://doi.org/10.1007/s11270-010-0516-8>
- Carter, T., & Jackson, C. R. (2007). Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. *Landscape and Urban Planning*, *80*(1–2), 84–94.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.06.005>
- Celik, I., Ortas, I., & Kilic, S. (2004). Effects of compost, mycorrhiza, manure and fertilizer on some physical properties of a Chromoxerert soil. *Soil and Tillage Research*, *78*(1), 59–67.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.02.012>
- Chappell, N. A., Bidin, K., & Tych, W. (2001). Modelling rainfall and canopy controls on net-precipitation beneath selectively-logged tropical forest. *Plant Ecology*, *153*(1–2), 215–229. <https://doi.org/10.1023/A:1017532411978>

- Clark, O. R. (1940). Interception of Rainfall by Prairie Grasses , Weeds , and Certain Crop Plants. *Ecological Monographs*, 10(2), 243–277.
- Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Crockford, R. H., & Richardson, D. P. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14(16–17), 2903–2920. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(200011/12\)14:16/17<2903::AID-HYP126>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2903::AID-HYP126>3.0.CO;2-6)
- Czemiel Berndtsson, J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36(4), 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- Daily, G. C. (1997). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press.
- David, J. S., Valente, F., & Gash, J. H. C. (2005). Evaporation of intercepted rainfall. In Anderson M. G. (Ed.), *Encyclopedia of hydrological sciences* (pp. 627–634). John Wiley.
- Domingo, F., Sánchez, G., Moro, M. J., Brenner, A. J., & Puigdefábregas, J. (1998). Measurement and modelling of rainfall interception by three semi-arid canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91(3–4), 275–292. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00068-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00068-9)
- Dussault, A. C. (2019). Functional Biodiversity and the Concept of Ecological Function. In E. Casetta, J. Marques da Silva, & D. Vecchi (Eds.), *From Assessing to Conserving biodiversity: Beyond the Species Approach* (Vol. 24, pp. 297–316). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10991-2_14
- Edwards, L., Burney, J. R., Richter, G., & MacRae, A. H. (2000). Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81(3), 217–222. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00162-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00162-6)
- Emilsson, T. (2008). Vegetation development on extensive vegetated green roofs: Influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecological Engineering*, 33(3–4), 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.05.005>
- Eumorfopoulou, E., & Aravantinos, D. (1998). The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. *Energy and Buildings*, 27(1), 29–36. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00023-6)
- Francis, R. A., & Lorimer, J. (2011). Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management*, 92(6), 1429–1437. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.012>
- Geller, G. N., & Smith, W. K. (1982). Influence of leaf size, orientation, and arrangement on temperature and transpiration in three high-elevation, large-leaved herbs. *Oecologia*, 53(2), 227–234. <https://doi.org/10.1007/BF00545668>
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. *HortScience*, 41(5), 1276–1285. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.5.1276>
- Getter, K. L., Rowe, D. B., & Andresen, J. A. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31(4), 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004>

- Gill, B. S., & Jalota, S. K. (1996). Evaporation from soil in relation to residue rate, mixing depth, soil texture and evaporativity. *Soil Technology*, 8(4), 293–301.
[https://doi.org/10.1016/0933-3630\(95\)00026-7](https://doi.org/10.1016/0933-3630(95)00026-7)
- Gill, S. ., Handley, J. ., Ennos, A. ., & Pauleit, S. (2007). Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115–133.
<https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>
- Hoek, G., Brunekreef, B., Goldbohm, S., Fischer, P., & van den Brandt, P. A. (2002). Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *The Lancet*, 360(9341), 1203–1209.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11280-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11280-3)
- Hofmann, M., Westermann, J. R., Kowarik, I., & van der Meer, E. (2012). Perceptions of parks and urban derelict land by landscape planners and residents. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(3), 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.04.001>
- Huber, A., & Iroumé, A. (2001). Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal of Hydrology*, 248(1–4), 78–92.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00394-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00394-8)
- Inkiläinen, E. N. M., McHale, M. R., Blank, G. B., James, A. L., & Nikinmaa, E. (2013). The role of the residential urban forest in regulating throughfall: A case study in Raleigh, North Carolina, USA. *Landscape and Urban Planning*, 119, 91–103.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.07.002>
- Institut Royal Météorologique belge. (2020). *Statistiques climatiques des communes belges - Gembloux (INS 92142)*.
https://www.meteo.be/resources/climatology/climateCity/pdf/climate_INS92142_912_0_fr.pdf
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Kasmin, H., Stovin, V. R., & Hathway, E. A. (2010). Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs. *Water Science and Technology*, 62(4), 898–905.
<https://doi.org/10.2166/wst.2010.352>
- Labeledzki, L., Kanecka-Geszke, E., Bak, B., & Slowinski, S. (2011). Estimation of Reference Evapotranspiration using the FAO Penman-Monteith Method for Climatic Conditions of Poland. In *Evapotranspiration* (Issue April). InTech. <https://doi.org/10.5772/14081>
- Levia, D. F., & Frost, E. E. (2006). Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 30(5), 605–632. <https://doi.org/10.1177/0309133306071145>
- Li, D., Bou-Zeid, E., & Oppenheimer, M. (2014). The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 9(5), 055002.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002>
- Li, J., Wai, O. W. H., Li, Y. S., Zhan, J., Ho, Y. A., Li, J., & Lam, E. (2010). Effect of green roof on ambient CO₂ concentration. *Building and Environment*, 45(12), 2644–2651.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.025>
- Li, Q., Zhang, H., Liu, X., & Huang, J. (2004). Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 79(3–4), 165–174. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0065-4>
- Lundholm, J., MacIvor, J. S., MacDougall, Z., & Ranalli, M. (2010). Plant Species and Functional Group Combinations Affect Green Roof Ecosystem Functions. *PLoS ONE*,

- 5(3), e9677. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009677>
- Lundholm, J. T., & Richardson, P. J. (2010). MINI-REVIEW: Habitat analogues for reconciliation ecology in urban and industrial environments. *Journal of Applied Ecology*, 47(5), 966–975. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01857.x>
- Lundholm, J., Tran, S., & Gebert, L. (2015). Plant functional traits predict green roof ecosystem services. *Environmental Science and Technology*, 49(4), 2366–2374. <https://doi.org/10.1021/es505426z>
- MacIvor, J. S., & Lundholm, J. (2011). Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering*, 37(3), 407–417. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.10.004>
- Madre, F., Vergnes, A., Machon, N., & Clergeau, P. (2014). Green roofs as habitats for wild plant species in urban landscapes: First insights from a large-scale sampling. *Landscape and Urban Planning*, 122, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.012>
- Martínez, G., Pachepsky, Y. A., & Vereecken, H. (2014). Temporal stability of soil water content as affected by climate and soil hydraulic properties: A simulation study. *Hydrological Processes*, 28(4), 1899–1915. <https://doi.org/10.1002/hyp.9737>
- McKinney, M. L. (2002). Urbanization, Biodiversity, and Conservation. *Bioscience*, 52(10), 883–890. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0883:UBAC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0883:UBAC]2.0.CO;2)
- McKinney, M. L. (2006). Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological Conservation*, 127(3), 247–260. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.09.005>
- Mickovski, S. B., Buss, K., McKenzie, B. M., & Sökmener, B. (2013). Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs. *Ecological Engineering*, 61(1 PARTC), 706–714. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.015>
- Moghbel, M., & Erfanian Salim, R. (2017). Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO₂ content. *Urban Climate*, 20, 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.012>
- Moran, A., Hunt, B., & Jennings, G. (2003). A North Carolina Field Study to Evaluate Greenroof Runoff Quantity, Runoff Quality, and Plant Growth. *World Water & Environmental Resources Congress 2003*, 1–10. [https://doi.org/10.1061/40685\(2003\)335](https://doi.org/10.1061/40685(2003)335)
- Nachabe, M. H. (1998). Refining the Definition of Field Capacity in the Literature. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(4), 230–232. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(1998\)124:4\(230\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(1998)124:4(230))
- Nagase, A., & Dunnett, N. (2012). Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning*, 104(3–4), 356–363. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.11.001>
- Nawaz, R., McDonald, A., & Postoyko, S. (2015). Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate. *Ecological Engineering*, 82, 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.061>
- Nimmo, J. R. (1997). Modeling Structural Influences on Soil Water Retention. *Soil Science Society of America Journal*, 61(3), 712–719. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100030002x>
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., & Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57(10), 823–833.

- <https://doi.org/10.1641/B571005>
- Park, A., & Cameron, J. L. (2008). The influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation. *Forest Ecology and Management*, 255(5–6), 1915–1925. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.025>
- Pauleit, S., Ennos, R., & Golding, Y. (2005). Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change—a study in Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 71(2–4), 295–310. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.03.009>
- Perry, T., & Nawaz, R. (2008). An investigation into the extent and impacts of hard surfacing of domestic gardens in an area of Leeds, United Kingdom. *Landscape and Urban Planning*, 86(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.12.004>
- Petchey, O. L., & Gaston, K. J. (2006). Functional diversity: back to basics and looking forward. *Ecology Letters*, 9(6), 741–758. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00924.x>
- Poorter, H., & van der Werf, A. (1998). Is inherent variation in RGR determined by LAR at low light and by NAR at high light? *Inherent Variation in Plant Growth: Physiological Mechanisms and Ecological Consequences.*, 309–336.
- Potschin, M. B., & Haines-Young, R. H. (2011). Ecosystem services: Exploring a geographical perspective. *Progress in Physical Geography*, 35(5), 575–594. <https://doi.org/10.1177/0309133311423172>
- Pypker, T. G., Bond, B. J., Link, T. E., Marks, D., & Unsworth, M. H. (2005). The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: Examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130(1–2), 113–129. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.03.003>
- Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobecki, T. M., & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116(1–2), 61–76. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)
- Save, R., Biel, C., & de Herralde, F. (2000). Leaf Pubescence, Water Relations and Chlorophyll Fluorescence in Two Subspecies of *Lotus Creticus* L. *Biologia Plantarum*, 43(2), 239–244. <https://doi.org/10.1023/A:1002704327076>
- Schäffler, A., & Swilling, M. (2013). Valuing green infrastructure in an urban environment under pressure - The Johannesburg case. *Ecological Economics*, 86, 246–257. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.05.008>
- Smith, W. K., & Geller, G. N. (1980). Leaf and environmental parameters influencing transpiration: Theory and field measurements. *Oecologia*, 46(3), 308–313. <https://doi.org/10.1007/BF00346257>
- Stovin, V., Poë, S., & Berretta, C. (2013). A modelling study of long term green roof retention performance. *Journal of Environmental Management*, 131, 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.026>
- Stovin, V., Poë, S., De-Ville, S., & Berretta, C. (2015). The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. *Ecological Engineering*, 85, 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.076>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates, Inc.
- Tukimat, N. N. A., Harun, S., & Shahid, S. (2012). Comparison of different methods in estimating potential évapotranspiration at Muda Irrigation Scheme of Malaysia. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 113(1), 77–85. <https://doi.org/34-2012091441739>

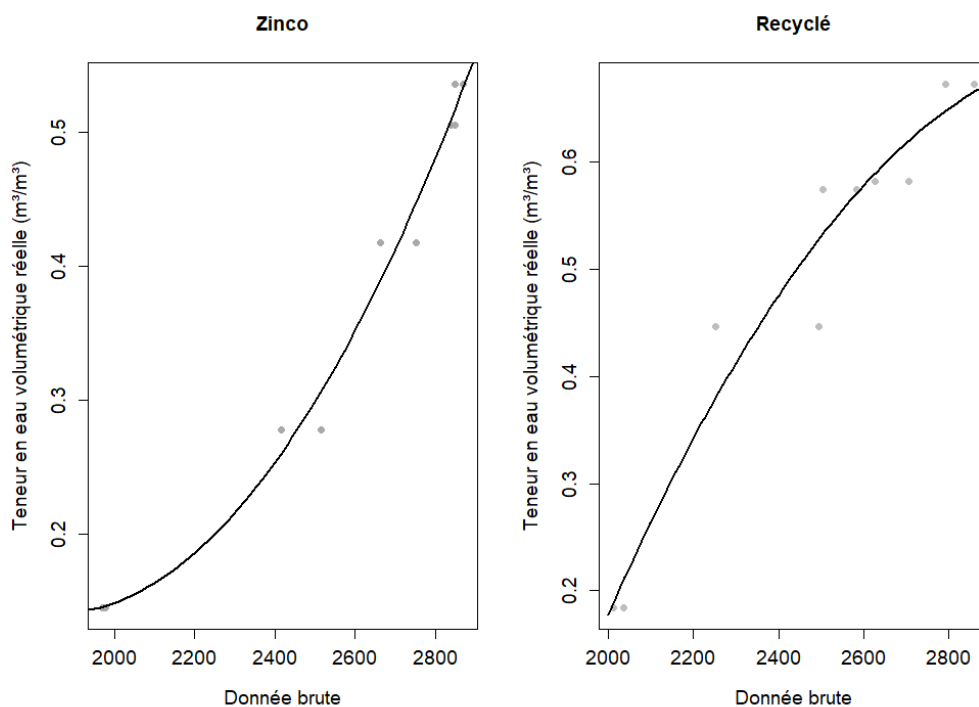
- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., & James, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, *81*(3), 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001>
- United Nations. (2019). *World Urbanization Prospects : The 2018 Revision*. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>
- Van Mechelen, C., Dutoit, T., Kattge, J., & Hermy, M. (2014). Plant trait analysis delivers an extensive list of potential green roof species for Mediterranean France. *Ecological Engineering*, *67*, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.043>
- Vesuviano, G., & Stovin, V. (2013). A generic hydrological model for a green roof drainage layer. *Water Science and Technology*, *68*(4), 769–775. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.294>
- Villarreal, E. L. (2007). Runoff detention effect of a sedum green-roof. *Hydrology Research*, *38*(1), 99–105. <https://doi.org/10.2166/nh.2007.031>
- Volder, A., & Dvorak, B. (2014). Event size, substrate water content and vegetation affect storm water retention efficiency of an un-irrigated extensive green roof system in Central Texas. *Sustainable Cities and Society*, *10*, 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.05.005>
- Voyde, E., Fassman, E., & Simcock, R. (2010). Hydrology of an extensive living roof under subtropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *Journal of Hydrology*, *394*(3–4), 384–395. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.013>
- Wolf, D., & Lundholm, J. T. (2008). Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability. *Ecological Engineering*, *33*(2), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.02.008>
- Wright, G. C., Hubick, K. T., Farquhar, G. D., & Rao, R. C. N. (1993). Genetic and Environmental Variation in Transpiration Efficiency and Its Correlation with Carbon Isotope Discrimination and Specific Leaf Area in Peanut. In *Stable Isotopes and Plant Carbon-water Relations* (pp. 247–267). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-091801-3.50025-8>
- Wright, H. (2011). Understanding green infrastructure: the development of a contested concept in England. *Local Environment*, *16*(10), 1003–1019. <https://doi.org/10.1080/13549839.2011.631993>
- Yang, J., Yu, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, *42*(31), 7266–7273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.003>

9 Annexes

Annexe 1 Paramètres des équations ajustées par régression polynomiale (degré 2) en vue de la calibration des capteurs d'humidité pour chacun des deux substrats.

	Zinco	Recyclé
Équation obtenue	$1,459 - 1,419 * 10^{-3} * x + 3,82 * 10^{-7} * x^2$	$-3,173 + 2,449 * 10^{-3} * x + 3,87 * 10^{-7} * x^2$
R ² ajusté	0,98	0,93
Écart-type résiduel	0,022	0,047
Normalité des résidus (test de Shapiro-Wilk, normalité si p-valeur > 0,05)	P-valeur = 0,62	P-valeur = 0,98
Variance homogène (test d'homogénéité de la variance, homogénéité si p-valeur > 0,05)	P-valeur = 0,83	P-valeur = 0,94

Annexe 2 Représentation des courbes illustrant les équations de régression obtenue en vue de la calibration des capteurs d'humidité pour chacun des deux substrats.



Annexe 3 Résultats des tests t de Welch mettant en évidence la différence significative des moyennes du taux de rétention entre les substrats pour chaque mois.

Mois	df	t	p-valeur
Mai	37,915	-2,2284	0,031 *
Juin	37,902	-6,5307	< 0,001 ***

Annexe 4 Résultats des tests t de Student à échantillon unique mettant en évidence la différence significative entre les taux de rétention mensuels moyens calculés à partir des bacs contenant de la végétation et les taux de rétention mesurés dans les bacs contenant le sol nu pour chaque substrat.

Mois	Substrat	df	t	p-valeur
Mai	Zinco	18	9,2198	< 0,001 ***
	Recyclé	18	6,6756	< 0,001 ***
Juin	Zinco	18	3,4337	0,003 **
	Recyclé	18	6,6661	< 0,001 ***

Annexe 5 Résultats des tests t de Welch mettant en évidence la différence significative ou non entre les taux d'atténuation moyens mesurés dans les bacs pour chaque substrat, ainsi qu'entre les retards moyens du pic d'écoulement mesurés dans les bacs, également pour chaque substrat.

Variable considérée	df	t	p-valeur
Taux d'atténuation du pic	36,55	6,71	< 0,001 ***
Retard entre le pic d'écoulement et le pic de précipitation	37,93	4,64	< 0,001 ***

Annexe 6 Résultats des tests t de Student à échantillon unique comparant les taux d'atténuation du pic d'écoulement moyens calculés à partir des bacs contenant de la végétation avec ces mêmes taux mesurés dans les bacs contenant le sol nu pour chaque substrat.

Substrat	df	t	p-valeur
Zinco	18	9,23	< 0,001 ***
Recyclé	18	5,09	< 0,001 ***

Annexe 7 Résultats des tests t de Student à échantillon unique comparant les délais moyens entre le pic d'écoulement et le pic de précipitations mesurés dans les bacs contenant de la végétation avec ces mêmes décalages mesurés dans les bacs contenant du sol nu pour chaque substrat

Substrat	df	t	p-valeur
Zinco	18	5,04	< 0,001 ***
Recyclé	18	-1,76	0,096