

Master 2ème année : Biodiversité, Écologie et Évolution

Parcours : Ingénierie Ecologique et Services Écosystémique

Année universitaire : 2017 -2018

Date de soutenance : 3 octobre 2018



Écologie des toitures végétalisées en Île-de-France : Analyse comparative des services rendus par les substrats



Projet GROOVES (Green ROOfs Verified Ecosystem Services)

Par Adeline Decourcelle

Encadrée par Marc Barra et Audrey Muratet.

Agence Régionale de la Biodiversité (ARB îdF) – Anciennement Association Natureparif,

Département biodiversité de l'Institut de l'Aménagement et de l'Urbanisme (IAU)





Le 12 mai 2018, l'association Natureparif est devenue officiellement **l'Agence Régionale de la Biodiversité en Île-de-France** (ARB îdF ; <http://www.arb-idf.fr/>). Cet ARB est la première en France. Elle est le fruit d'un partenariat entre la Région Île-de-France et l'Agence Française pour la Biodiversité, avec le soutien financier de l'État et de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. L'ARB îdF est hébergée au sein de **l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme** (IAU îdF) dont elle constitue le département biodiversité. Les missions qu'elle remplit à ce jour sont les suivantes.

- **Amélioration des connaissances de la biodiversité francilienne** en collectant et en partageant les données recueillies sur le terrain par les naturalistes via la base de données Cettia IdF (<http://cettia-idf.fr/bdd>). Dans cette optique, chaque année des formations de terrains sont organisées sur les différents groupes taxonomiques (Oiseaux, Amphibiens, Reptiles et Flore).
- **Situation annuelle de la biodiversité francilienne** en réalisant son suivi temporel et spatial. Des indicateurs reflétant l'état de la biodiversité actuelle et son évolution sont calculés à partir de données collectées par de nombreux naturalistes. Ainsi au printemps 2018, l'équipe a mis en évidence le fort déclin des oiseaux lié principalement à l'agriculture intensive (monoculture, utilisation des pesticides, homogénéisation des paysages, ...).
- **Préservation de la biodiversité**, le concours Capitale Française de la Biodiversité, et le label Ecojardin sont des initiatives révélant des pratiques favorables à la nature et à la biodiversité en milieu urbain. Ces nouvelles pratiques sont diffusées au travers des différents ateliers organisés pour les acteurs locaux.
- **Sensibilisation du public**, des conférences sont organisées à destination du grand public et **des professionnels**

Désormais, l'ARB îdF détient une nouvelle compétence **d'Ingénierie territoriale**. Elle peut ainsi proposer des solutions favorables à la réintroduction de la biodiversité en ville au travers des projets d'aménagement urbain.

Mes remerciements vont,

A l'Institut d'Urbanisme et d'Aménagements et au département biodiversité sans qui cette expérience n'aurait jamais existé.

A Marc, pour m'avoir encadrée avec enthousiasme, humour et convivialité. Tu m'as laissé battre de mes propres ailes tout en restant disponible quand j'en avais besoin. Ta confiance et ta souplesse m'ont permis de prendre confiance en mon travail et mes savoirs. Merci pour ce voyage aux quatre coins de l'île de France pour me faire vivre une expérience hors du commun sur les toitures végétalisées. Ton soutien et ta bonne humeur m'ont fait vivre six mois inoubliables à tes côtés.

A Audrey, pour sa gentillesse et son professionnalisme. Ton aide sur les analyses statistiques m'a été précieuse. Ta passion pour les plantes et les friches et sans limite, et s'exprime avec la même fougue au coin d'un trottoir ou sur les toits.

A Gilles, pour m'avoir mis au défi de piloter l'étude GROOVE le temps de la campagne 2018. Ce challenge m'a valu de longues heures au téléphone et un casse-tête pour optimiser le planning des équipes et vous ouvrir les portes de ces petits écrans de verdure perchés sur les toits. Ton esprit critique sur les aménagements urbains m'a fait prendre conscience des actions exemplaires mises en place par les villes engagées en faveur de la biodiversité.

A Gwendoline, pour sa gentillesse et sa complicité tout au long de ces six mois et pour m'avoir « obligée » à me déconnecter des toitures végétalisées le soir afin

de prendre du recul et profiter de la vie comme elle vient.

A Mustapha, pour ses prouesses en informatique, qui m'a aidé dans la construction de ma base de données et pour sa joie de vivre.

A Emilie, la dernière recrue, pour sa complicité et son soutien à toutes épreuves derrière un bureau ou au milieu des ronces dans un terrain militaire.



A Jonathan, pour être devenu le temps d'une journée mon binôme sur les toitures végétalisées.

A Maxime de m'avoir transmis le temps d'une matinée sa passion pour l'ornithologie. Au souvenir de ces appels au secours sur les toitures, à ton engagement sans faille et à ta vivacité d'esprit.

A Maellis, ma voisine de bureau qui m'a réconforté dans les moments de doute et a mis le sud en bouteille pour moi.

Aux petits Lu qui ont rendu ce stage surprenant et drôle. Vous êtes spontanés, attachants et malicieux.

A Jean-Christophe Lata, Ludovic Foti, Laurent Palka, Pierre Alain Marron et Lionel Ranjard de grands passionnés du sol pour leur disponibilité. Grâce à vous, le sol est devenu un allié tant par sa diversité que sa complexité.

A tous les stagiaires pour l'ambiance agréable du self et vos discussions animées autour d'un chocolat.

Aux gestionnaires pour leur disponibilité et leur enthousiasme dans le Projet GROOVES.

Aux permanents de l'IAU, pour leurs conversations constructives et diversifiées qui m'ont permis d'établir les liens entre les composantes de la ville.

A ma famille, mes amis et tous ceux qui ont eu confiance en moi et m'ont soutenu pour me permettre de m'épanouir et de réaliser avec plaisir mon Master 2 de

Biodiversité, Ecologie et Evolution.

Ces six mois hauts en couleur et riches en émotions ont passés beaucoup trop vite à mon goût. J'ai été entourée par une équipe formidable, hétéroclite, passionnée et engagée pour la biodiversité. Cette expérience m'a métamorphosée et restera gravée dans ma mémoire. J'ai beaucoup apprécié les longues heures passez avec vous autour d'un verre au Grillon. J'ai trouvé en vous des amis et des modèles. Comme tu me l'avais dit Marc « Nos stagiaires en sortent changés

Sommaire

Introduction	1
1. Climat et biodiversité : la situation en Île-de-France	1
2. Nature en ville et écologie urbaine	1
3. Quelle écologie des toitures végétalisées ?	2
4. Qu'est-ce que le projet GROOVES ?	2
5. Ressources bibliographiques sur les substrats	4
6. Problématique et questions sur les substrats	4
Matériel et méthodes.....	5
1. Localisation des toitures végétalisées	5
2. La collecte de données sur le terrain et en laboratoire	6
3. Saisie des données en vue de leur exploitation	12
4. Méthode d'analyse des données	12
Résultats et Analyses	14
1. Présentation des 30 toitures végétalisées	14
2. Les paramètres choisis (sur 24 toitures)	17
3. Les services étudiés (sur 24 toitures)	19
4. Flore et Biomasse microbienne	21
5. Rétention maximale en eau d'une toiture végétalisée.....	25
6. Teneur en Carbone : stock au printemps 2018.....	27
7. Bilan comparatif des fonctions écologiques et des services	28
Discussion et Ouverture.....	29
1. Élément de réponse à nos questions scientifiques	29
2. Remise en perspective des résultats à l'échelle locale et globale	31
3. Perspective 2019 pour le projet GROOVES.....	33
4. Conclusion générale sur l'étude des substrats	36
Bibliographie	37
Résumé	38
Abstract.....	38
Annexes	39

Introduction

1. Climat et biodiversité : la situation en Île-de-France

L'Île-de-France est une région impactée par l'urbanisation, celle-ci représente 21 % de son territoire selon l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme îdF en 2012 (Fig. 1). Cela s'accompagne d'un déficit en espaces-verts : 24 % des communes ont moins de 10 m² d'espaces verts par habitants. [Muratet, 2016]. L'**urbanisation** entraîne la conversion des espaces naturels ou agricoles, leur mitage ainsi que l'imperméabilisation des sols. Le phénomène d'artificialisation accélère les effets du changement climatique. Avec l'**imperméabilisation** massive des villes, les collectivités doivent aujourd'hui

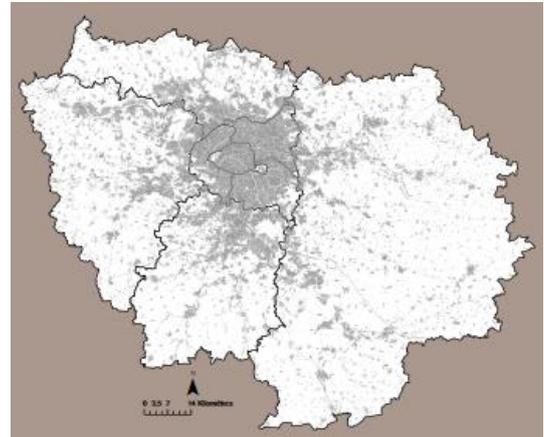


Figure 1 : L'urbanisation de la région Île-de-France, avec en gris les 21 % de territoires urbanisés, source l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme îdF 2012 (Muratet 2016)

faire face à la gestion des inondations, du ruissellement ou dans certains cas, des mouvements de terrains.

En parallèle des changements climatiques, la **biodiversité** en milieu urbain est également affectée. Les effectifs des oiseaux communs ont décliné de plus de 30 % en 10 ans [Muratet, 2016]. Sur la même période, l'abondance des papillons en ville a diminué de 22%. A contrario, la richesse en plantes dans les interstices urbains a augmenté de 90 % en 7 ans, ce qui laisse penser que les changements de pratiques de gestion (politiques de végétalisation ; interdiction des pesticides par la loi Labbé en 2017) ont un effet positif sur la flore urbaine [Muratet, 2016].

2. Nature en ville et écologie urbaine

Face aux risques liés aux changements climatiques et à l'effondrement de la biodiversité en milieu urbain, les collectivités sont de plus en plus nombreuses à s'engager dans des politiques favorisant la nature en ville. La **biodiversité urbaine** n'est plus restreinte à son rôle esthétique et récréatif. Elle répond à des besoins réels : infiltration et dépollution de l'eau, amélioration de la qualité de l'air, production de biomasse, maintien de la biodiversité urbaine, réduction de la consommation en énergie des bâtiments. Ces solutions « naturelles » basées sur des fonctions écologiques remplacent le génie civil aux solutions qualifiées de « grises ». Il a été montré que ces alternatives « naturelles » sont bien moins énergivores en matière première mais aussi moins coûteuses (construction et entretien) comparés aux solutions grises. D'autres volontés politiques émergent comme l'ambition de la ville

de Paris (Plan Biodiversité 2011) de végétaliser 100 ha de toitures pour leurs multiples fonctions de rafraîchissement, de rétention d'eau, de stockage de carbone, de lieux d'accueil pour la biodiversité.

3. Quelle écologie des toitures végétalisées ?

Les toitures végétalisées s'imposent peu à peu dans les villes. Dans les années 80, la Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL équivalent Allemand de l'ADIVET : Association des Toits Végétalisés) a démontré que la végétalisation des toits augmente la durée de vie de l'étanchéité. Aujourd'hui, les professionnels leur attribuent de nombreux bienfaits pour le maintien de la biodiversité et la fourniture de divers services écosystémiques (rétention en eau, stockage en carbone, rafraîchissement urbain, etc.). Or, **Yann Dusza** (Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris, 2017) a effectué des mesures (en laboratoire et *in situ*) en mélangeant différentes espèces de plantes et en utilisant des épaisseurs de substrat variés. Il a montré que les toitures végétalisées ne peuvent pas remplir simultanément tous les services qu'on leur attribue. Des choix de conception sont alors nécessaires pour optimiser ou privilégier un service écosystémique en particulier. Ainsi, en 2014, **Frédéric Madre** (Museum National d'Histoire Naturelle) a étudié la biodiversité d'une centaine de toitures en France et a montré que la structure végétale influence les communautés d'arthropodes. Les toitures avec une strate arbustives ont une plus grande richesse spécifique. L'étude GROOVES (Green Roof Verified Ecosystem Services) mis en place par l'ARB ÎdF s'inscrit dans la suite de ces deux travaux de thèse.

Fontions écologique /services écosystémique

Un **écosystème** correspond aux interactions entre les êtres vivants et leur milieu.

Ces écosystèmes produisent des **fonctions écologiques** qui maintiennent ces écosystèmes (diversité génétique, biomasse, rétention de l'eau, décomposition de la matière organique)

En 2005, le Millennium Ecosystem Assessment à définit les **services écosystémiques** comme l'utilisation par l'homme des biens ou des services produits grâce à ces fonctions écologiques pour assurer leur bien-être. Par exemple : la régulation des eaux ou le stockage de CO2.

4. Qu'est-ce que le projet GROOVES ?

Le **projet Green Roof Verified Ecosystem Services** (GROOVES) a été lancé en 2017 par l'ARB ÎdF. Cette étude vise à mieux comprendre la contribution des toitures végétalisées à la biodiversité et à certains services écosystémiques comme la rétention d'eau ou le stockage de carbone. Elle s'appuie sur des toitures existantes en Île-de-France. La volonté de l'ARB est de mobiliser des connaissances transversales et plusieurs structures de recherche et d'expertise technique (IEES Paris, INRA de Dijon, MNHN, l'AgroParisTech et le Cerema). Ainsi, cette **recherche exploratoire** associe des

naturalistes, des chercheurs en écologie, des ingénieurs agronomes et des techniciens. Le projet rassemble également des partenaires financiers comme l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, la Fondation Placoplatre ou encore l'ADIVET (Association des toitures végétales).

Cette étude vise à analyser **l'écosystème de toitures végétalisées extensives, semi-intensives et intensives** (32 toitures au total) **sur la période 2017 – 2019**. Sur chaque toiture, les équipes effectuent des inventaires des invertébrés, de la flore et de ses interactions avec les pollinisateurs et les mycorhizes. Afin d'être comparables avec des inventaires réalisés au sol, ces relevés s'appuient, lorsque cela est possible, sur des protocoles standardisés de l'observatoire Vigie Nature tels que le protocole Vigie-flore pour le suivi de la flore et le Suivi photographique des insectes pollinisateurs (SPIPOLL) pour l'analyse de la fonction de pollinisation. (Fig. 2)



Figure 2 : Suivi Photographique des insectes Pollinisateurs (SPIPOLL) sur du *Sedum album*, par Lucien Claivaz et Luka Thomas, toiture du Périscope ©Adeline Decourcelle

Focus sur la Typologie des toitures végétalisées : une définition pertinente en écologie scientifique ?

La végétalisation du bâti est un marché principalement tenu par les professionnels de l'étanchéité. Ces derniers utilisent une typologie distinguant trois systèmes : **extensif, semi-extensif et intensif**. Ces systèmes sont déterminés uniquement par l'épaisseur du substrat à laquelle sont associés un type de gestion, d'irrigation et de strate végétale (Tableau A, [Adivet, 2018]). *Cette classification est-elle pertinente ?* Selon Frédérique Madre [Madre, 2014], une typologie plus adaptée s'articulerait autour de la strate végétale dominante.

En France, la majorité des toitures (90%) sont conçues « en série » selon le modèle suivant : un substrat minéral (généralement de la pouzzolane ou un mélange de perlite, vermiculite, etc.), ainsi qu'une végétation réduite à quelques Crassulacées cultivées (Orpins) sur de la fibre coco. La démocratisation de ces systèmes extensifs par les étancheurs vient de leur légèreté, leur faible coût et entretien. Ce modèle est parfaitement industrialisé : membrane d'étanchéité, substrat et végétaux pré-cultivés issus de pépinières sont vendus clés en main.

Tableau A : Les systèmes de toitures végétalisées basés sur l'épaisseur de substrat et les paramètres de conception et de gestion associés, extrait d'Habiter durable.

Système de toiture	Toiture extensive	Toiture semi-intensive	Toiture intensive
Epaisseur de substrat	4 à 12 cm.	12 à 30 cm	30 à 80 cm
Formation végétale	Mousse/ Orpins/ Graminée	Orpins/ Graminée/ Vivace	Herbacée/ Arbustive/ Arborée
Gestion	2 fois / an	4 fois / an	Régulier
Irrigation	Pas d'arrosage	Ponctuel en été	Régulier

Des prélèvements de substrats et un recueil d'informations sur la conception et la gestion de ces toitures sont également réalisés. L'ensemble des protocoles est présenté en page 5 et 6.

La finalité de cette étude est de mieux comprendre le **fonctionnement écologique** des différents systèmes de toitures végétalisées et leur **intérêt en milieu urbain**, notamment en identifiant certains services écosystémiques rendus. Les connaissances obtenues permettront de faire une photographie de l'état écologique des toitures végétalisées, de les comparer entre elles. De plus, des préconisations seront produites à destination des concepteurs et maîtres d'ouvrage afin de proposer des toitures végétalisées plus adaptées à la biodiversité ou optimisant certains services (rétention en eau et stockage de carbone).

5. Ressources bibliographiques sur les substrats

Les ressources bibliographiques traitant spécifiquement des substrats de toitures végétalisées à grande échelle sont peu nombreuses. Deux études ont été recensées :

- **Plante & Cité** : expérience menée sur les paramètres de substrat destinés aux toitures extensives ;
- **Etude « Toitures végétalisées » dans l'agglomération genevoise** : expérience réalisée in-situ sur un échantillon comparable à celui du projet GROOVES avec une quantité réduite de paramètres de sol (9 paramètres).

Une synthèse bibliographique de 2017, montre que les substrats des toitures végétalisées diffèrent du sol naturel. Il existe peu de connaissances sur les effets de l'épaisseur et de la nature du substrat sur l'abondance et la diversité des micro-organismes, en particulier sur le cycle de l'azote. [Lata, 2017]

6. Problématique et questions sur les substrats

L'objectif de ce stage était d'établir un état des lieux de la qualité des substrats de toitures végétalisées en 2018 en étudiant les **paramètres biologiques, physiques et chimiques** de ces derniers, ainsi que les facteurs qui les influencent. En retour, nous verrons en quoi le choix de tel ou tel substrat peut influencer à son tour d'autres paramètres, comme la **diversité floristique, la capacité de rétention d'eau**, etc.

Notre problématique est la suivante : *Les toitures végétalisées remplissent-elles des fonctions écologiques (richesse floristique et biomasse microbienne) ou des services supports (rétention en eau et stockage de carbone) dépendant des propriétés intrinsèques du substrat ?*

Plusieurs questions en découlent :

- a) *Les substrats mis en place sur les toitures sont-ils les mêmes ?*
- b) *La variabilité des paramètres de sol est-elle liée au système de conception définie par les professionnels (ADIVET) ou à la strate végétale dominante telle que proposée par F.Madre ?*
- c) *La variabilité des paramètres du substrat influence-t-elle la biodiversité (richesse floristique et biomasse microbienne) ? D'autres paramètres liés à l'écosystème toiture végétalisée entrent-ils en jeu ?*
- d) *Quelles sont les capacités de rétention en eau et de stockage en carbone des différents couples substrat-végétation ?*

Matériel et méthodes

1. Localisation des toitures végétalisées

Les toitures végétalisées ont été choisies en 2017 selon les critères suivants : être à moins d'une heure de Paris par les transports et avoir une surface supérieure à 200 m² [Johan, 2017]. **Trente sites** ont été prospectés en 2017 pour garantir la fiabilité statistique du projet. Cet échantillon a été conservé en 2018 à l'exception de deux toitures ne répondant plus aux critères (distance, accessibilité, forte dégradation), trois nouveaux sites ont été ajoutés. La cartographie des toitures végétalisées en 2018 (Fig. 3) montre que l'échantillon est composé de quinze toitures dites extensives (en orange), six toitures dites semi-extensives (en jaune), et sept toitures dites intensives (en vert) selon la classification de l'ADIVET. Les toitures sélectionnées se situent majoritairement en **milieu urbain** ou dans des zones marquées par l'activité anthropique.

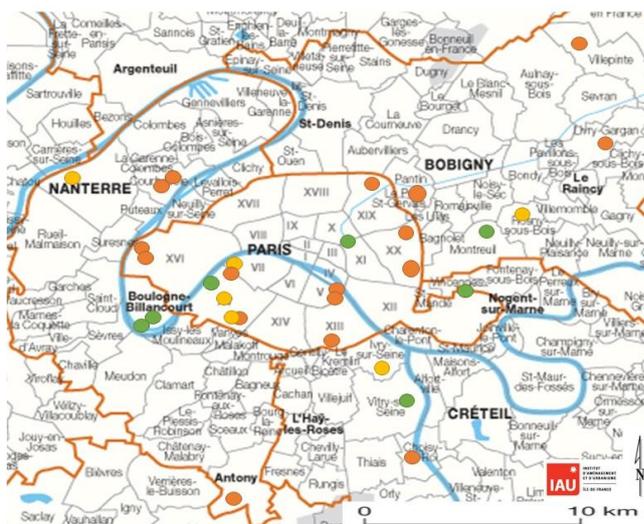


Figure 3 : Cartographie des toitures végétalisées prospectées pour l'année 2018, classée selon les typologies ADIVET : extensive (orange), semi-extensive (jaune) et intensive (verte), réalisée par Adeline Decourcelle, sur un fond de carte de l'IAU

Chaque toiture végétalisée est présentée en Annexe 1 avec une photographie du site et les paramètres qualitatifs et quantitatifs intéressants pour un gestionnaire.

2. La collecte de données sur le terrain et en laboratoire

L'étude GROOVES prévoit plusieurs protocoles sur chacune des toitures pour étudier la plupart des taxons :

- **Flore** : Protocole Vigie-Flore sur 10 m² et complété par un inventaire exhaustif ;
- **Pollinisateurs** : Suivi Photographique d'Insectes POLLinisateurs [protocole SPIPOLL, <http://www.spipoll.org/>] Quatre sessions de SPIPOLL sont réalisées par an : trois au premier passage (entre le 28 mai et le 20 juin 2018), un seul est effectué au second passage (entre le 7 juillet et le 20 juillet 2018) ;
- **Arthropodes** : Transect aléatoire au filet fauchoir (2 min) et à l'aspirateur à insectes (10 min), planche à invertébrés (2^{ème} passage uniquement). Deux séries d'inventaires sont réalisés par an avec au minimum **trois semaines d'intervalle** ;
- **Mycorhizes** : une plante est prélevée avec sa racine à chaque point de prélèvement. L'extraction des endomycorhizes sera réalisée par PCR après nettoyage des racines, par l'équipe de Laurent Palka (MNHN) ;
- **Bryophytes** : inventaire exhaustif des mousses réalisés par Sébastien Filoche (MNHN) ;
- **Collemboles** : analyses de la diversité réalisées par Céline Houssin (MNHN) ;
- **Rafraichissement** : mesure de l'évapotranspiration dans une chambre, une journée par toiture, réalisé par David Ramier (CEREMA de Trappe) ;
- **ADN environnemental** : analyse de l'abondance et de la diversité microbienne (bactéries et champignons) afin de dresser une cartographie des toitures végétalisées réalisé par Pierre Alain Maron et Lionel Ranjard (INRA de Dijon).

Chaque protocole est renouvelé sur l'ensemble des trente-deux toitures à l'exception des protocoles Collembole et ETP. La mise en place des protocoles SPIPOLL et Vigie Flore permet de comparer les résultats obtenus sur les toits à ceux obtenus dans d'autres types d'espaces verts urbains.

Seuls les inventaires floristiques, les prélèvements de substrat et l'obtention des données sur la conception et la gestion des toitures végétalisées seront détaillés ci-après.

a. Inventaire floristique

L'**inventaire floristique** réalisé sur les toitures végétalisées est issu du **protocole Vigie-Flore** créé par le MNHN (Fig. 4). Ce protocole consiste à placer dix carrés de 1 m² sur chaque toiture. Dans chaque carré, la liste des taxons présents est dressée. La somme de chaque taxon unique pour chaque toiture donne l'indice de richesse spécifique donc sa **richesse floristique**.

Ces inventaires floristiques sont effectués par Audrey Muratet (ARB ÎdF) chaque année au même endroit. Un seul passage est réalisé par an pendant le mois de Juin pour optimiser le nombre d'espèces végétales tout en facilitant la reconnaissance [Johan, 2017].

J'ai participé aux relevés Flore sur les toitures de GTM Bâtiment (Nanterre), de l'Ecole Fontane (Courbevoie) et de la Maison du Valcaron (Courbevoie)



Figure 4 : Protocole Vigie-Flore réalisée sur la toiture spontanée de GTM Bâtiment, par Audrey Muratet et Sébastien Filoche © Adeline Decourcelle

b. Prélèvements de substrat

Le protocole « Substrat » a été **imaginée spécifiquement** pour cette étude avec l'aide d'**IEES-Paris**. Pour chaque toiture, dix points de prélèvements sont réalisés sur une épaisseur maximale de 12 cm à l'aide d'un transplantoir à bulbes. Les points de prélèvement sont répartis de manière aléatoire sur une surface homogène et en évitant les bordures. Les volumes prélevés servent aux analyses en laboratoire pour l'année 2018, mais aussi aux analyses prévues en 2019 (ADN environnemental et ¹⁵N). Pour chaque prélèvement, les plantes sont conservées pour l'étude des mycorhizes, en partenariat avec Laurent Palka et Yves Berthaud du MNHN.

Ce protocole expérimental répond aux particularités des toitures tout en limitant l'effet intrusif des prélèvements (faible épaisseur, petite surface, grosse granulométrie). Pour chaque toiture, les substrats sont classés en fonction de leur aspect visuel : terre agricole, substrat mixte (éléments terreux et minéraux) et substrat minéral (plus de 80 % d'éléments grossiers de type pouzzolane), ce paramètre a été inspirée des résultats de Pierre Alain Maron et Lionel Ranjard (INRA de Dijon). Pour la traçabilité des prélèvements une cartographie approximative est réalisée à partir des croquis terrains,



Figure 5 : Cartographie des prélèvements de substrat pour la toiture végétale de Cité de la Mode (CIMOD) sur fond de carte Géoportail au 1/333ème reprenant les épaisseurs de substrat aux différents points de prélèvement, la date de prélèvements et la température de l'air © Adeline Decourcelle

comme celle de la toiture de la Cité de la Mode et du Design (Fig. 5, CIMOD)

Au cours du protocole « Substrat », les étapes suivantes sont réitérées pour les dix points de prélèvement, une série de photographies les illustre en conditions réelles (Fig. 6) :

- réaliser une photographie du point de prélèvement (n° du jalon et plante) ;
- effectuer le prélèvement de substrat à l'aide du transplantoir et d'une bassine en évitant les contaminations (gouttes de sueur, éternuements, ...) ;
- mettre sous enveloppe une plante avec ses racines pour l'extraction des endomycorhizes ;
- homogénéiser le substrat afin de décompacter les agrégats et uniformiser le prélèvement ;
- remplir un tube de 15 mL pour les analyses de l'ADN environnemental et transférer le substrat restant dans la seconde bassine pour constituer le pool global de « terre » ;
- mesurer l'épaisseur maximale du substrat à l'aide d'une tige en fer et d'un mètre. Lorsque le substrat est trop sec, une épaisseur moyenne est estimée.

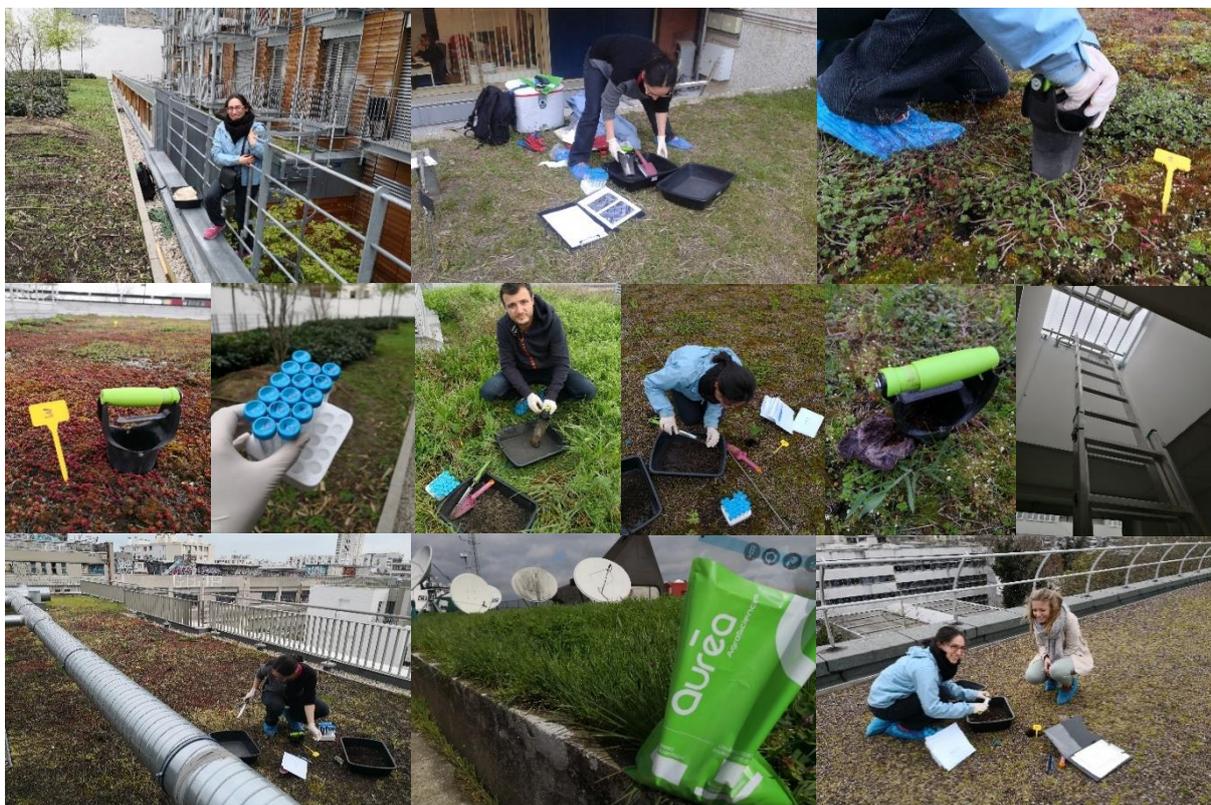


Figure 6 : Photographies des différentes phases du prélèvement des substrats pour la campagne 2018 © Marc Barra

Tous les ustensiles sont nettoyés à l'alcool entre chaque toiture. En arrivant sur la toiture, des chaussons de protection et des gants en latex sont revêtus pour limiter les contaminations du substrat à destination de l'ADN environnemental. A la fin des prélèvements, le pool global de substrat est homogénéisé. De celui-ci trois tubes de 15 mL sont conservés pour les protistes et l'isotope de l'azote

¹⁵N (IEES Paris). En fonction de l'épaisseur des toitures, les 4 à 7 litres restants sont conditionnés dans un sac en plastique pour l'envoi au laboratoire de sol.

L'ensemble des prélèvements sont maintenus au froid dans une glacière avant d'être conditionnés au réfrigérateur à l'ARB ÎdF. Ceci limite l'activité des micro-organismes et permet de prévenir les changements radicaux de communautés. [Switch bactérien ayant été étudié par J.C Lata].

Les prélèvements de substrat ont été réalisés du **3 avril au 3 mai 2018**. Pour des raisons d'autorisations d'accès, le protocole « Substrat » a été réalisé mi-juin sur les toitures de OLSER et GRENEL. Les informations météorologiques sont obtenues en direct sur Météo France.

J'ai participé à l'intégralité du protocole « Substrat » pour l'ensemble des toitures végétalisées en binôme avec Marc Barra (ARB ÎdF) ou Jonathan Flandin (ARB ÎdF).

Le protocole « substrat », redéfini en 2018, garantit la réalisation d'un maximum de mesures tout en minimisant l'impact de cette méthode très intrusive.

c. Analyses biologiques, chimiques et physiques du substrat en laboratoire de sol agréé

Les analyses de substrat ont été réalisées par le laboratoire agréé Auréa Agrosience. Il existe un protocole défini par l'ADIVET pour déterminer la rétention maximale en eau et autres mesures à la Capacité Maximale en Eau (CME) [ADIVET, 2018, page 60]. Ces mesures nécessitent près de 20 L de substrat. Nous avons considéré qu'un tel prélèvement, en plus de créer une dégradation importante aux yeux du gestionnaires, serait très dommageable pour les toitures de petite taille et de faible épaisseur. Ainsi, nous avons convenu avec Auréa qu'un volume minimum de 4 à 5 L suffirait à réaliser l'intégralité des mesures physico-chimiques, biologiques et physiques. En contrepartie, les mesures de CME sont répliquées deux fois. Les autres analyses sont effectuées une fois et renouvelées si les valeurs sont aberrantes.

Dans le cadre des premières analyses de substrats du Projet GROOVES, une dizaine de paramètres ont été sélectionnés parmi les indicateurs de sol utilisés en agronomie [Gobat, 2010 ; Fardeau, 2015 ; analyse de sol réalisée en routine par Auréa]. Les méthodes d'analyse effectuées par le laboratoire de sol, sont brièvement décrites ci-dessous :

Lors des mesures granulométriques, le substrat est tamisé à 2 mm afin de séparer la « terre fine » et les **éléments grossiers (plus de 2 mm)**. La terre fine subit une destruction des matières organiques (par eau oxygénée) et une dispersion des particules élémentaires (à l'aide de sodium). Après rinçage,

le **pourcentage de sable** est obtenu par un tamisage à 0,05 mm. Le pourcentage de limon (particules comprises entre 0,002 et 0,05 mm) et le **pourcentage d'argile** (particules inférieures à 0,002 mm) sont obtenus par sédimentation.

Le **potentiel Hydrogène** (pH eau) est obtenu par dilution du substrat au 1 volume de substrat pour 5 volumes d'eau. La mesure du pH est effectuée après une agitation d'une heure à 22°C.

La **Capacité d'échange cationique** (CEC) est obtenue par la méthode Metson. L'ajout en excès d'acétate d'ammonium va remplacer les cations fixés sur le complexe argilo-humique (CAH). Après rinçage à l'alcool, l'ammonium (NH₄⁺) fixés sur le CAH est mesuré.

La mesure de l'**azote** (Méthode Dumas) est obtenue par combustion en présence d'oxygène à 950°C. Le **taux de matière organique** (MO) est calculé par la différence de masse avant et après calcination à 480°C. Le **rapport C/N** témoigne l'état de dégradation des MO dans le substrat. Un rapport C/N faible (proche de 10) est liée à une MO fraîche est facilement minéralisable.

La **Rétention Maximale en Eau** (à Capacité Maximale en Eau ou CME) est obtenue par différence de masse [protocole FLL]. L'échantillon de substrat est compacté dans un cylindre, saturé en eau et ressuyé pendant 2 heures. La RME est la différence entre la masse après ressuyage et la masse sèche.

La **biomasse microbienne** est obtenue par fumigation et extraction. Elle correspond à la fraction vivante du sol de la matière organique.

d. Récupération des données de conception et gestion

Lors du protocole « substrats », des fiches terrains sont remplies sur :

- le **type de substrat dominant** (terre végétale, substrat mixte ou substrat minéral) ;
- la **hauteur de la toiture** (mesure faite à l'aide d'un laser si le garde-corps le permet) ;
- la **strate végétale dominante** (orpins, autres herbacées ou mixte (orpins et autres herbacées)) ;
- la **gestion** éventuelle (jamais (0) / contrôle (1) [entretien des bandes stériles, arrachage sélectif pour l'étanchéité] / fauche ou tonte (2)) ;
- l'**irrigation** éventuelle (eau de pluie ou arrosage).

Ces données sont vérifiées et complétées par les fiches terrains de la campagne 2017. Une confirmation a été envoyée aux gestionnaires et reste parfois sans réponse. En 2018, à l'aide de l'outil Géoportail, j'ai renseigné les **coordonnées GPS** (Centre des toitures) et les **surfaces des toitures**

(hors modules techniques supérieurs à 4 m², pour les grandes toitures seule la surface prospectée par les inventaires est prise en compte). Le **type de toiture** est obtenu grâce l'épaisseur moyenne.

Focus sur la campagne de mesures :

Courant juin, le laboratoire Auréa a transmis une liste de toitures pour lesquelles les mesures physiques et à CME n'ont pas pu être réalisées du fait de :

- la grande variabilité des substrats *in situ* : teneurs en éléments grossiers et épaisseur des substrat très variables ;
- la diversité des analyses prend en compte des unités différentes (gramme et litre), des quantités et des matériaux différents (200 g de terre fine [particules de moins de 2mm de diamètre], 800 g d'éléments inférieur à 5 mm et enfin 2 à 3 L de matériau brut) (Fig. A) ;
- les analyses chimiques induisent des altérations des échantillons (incinération, destruction de la matière organique, etc.).

Ces analyses sont classiquement effectuées sur des sols agricoles. Elles sont donc peu adaptées aux toitures de type extensives, ce qui a rendu très difficile l'appréciation des volumes de substrat nécessaires.

Afin de pouvoir réaliser les analyses physiques manquantes, les équipes naturalistes ont récupéré les litrages manquants de 1,5 à 3,5 L. Nous avons émis les hypothèses suivantes : à son installation la granulométrie du substrat est homogène en tout point et la granulométrie d'un substrat varie peu au cours du temps. **Les propriétés physiques du substrat sont considérées similaires en tout point de la toiture végétalisée.**

Figure A : Groupes d'analyses effectués par Auréa, avec les quantités de substrat recommandées et la durée minimum des analyses avant de recevoir les résultats par le laboratoire de sol

Type analyse	Quantité de substrat	Durée minimum
Analyse physico-chimique et Eléments traces métallique (ETM)	200 g de terre fine (granulométrie inférieure à 2 mm)	Une à deux semaines
Analyse biologique	800 g de terre (granulométrie inférieure à 5 mm)	Au moins six semaines
Analyse physique (courbes pF) et mesures à Capacité Maximale en Eau (CME)	2 à 3 L de substrat	Au moins deux semaines

3. Saisie des données en vue de leur exploitation

Une base de données a été créée sur le logiciel Access. L'extraction des données est simplifiée au moyen de requêtes. Cette base regroupe les tables de données suivantes :

- **description générale des toitures végétalisées** (localisation GPS, surface prospectée, hauteur toiture, année de conception, etc.) ;
- **gestion des toitures** (type de gestion des végétaux et type d'arrosage, contact des gestionnaires, etc.) ;
- **visite** pour les prélèvements (date, conditions météorologiques, remarques) ;
- **analyses physicochimiques** (pH, granulométrie, CEC, élément nutritifs, Eléments Traces Métalliques (ETM), etc.) ;
- **analyses biologiques** (Biomasse microbienne, Matière organique, Azote, etc.) ;
- **analyses physiques** (Rétention maximale en eau, porosité, réserve utile, etc.) ;
- **points de prélèvements** (épaisseur de substrat et plantes prélevée).

Les liens entre les tables sont du type « un à plusieurs » (Annexe 2). Une page d'accueil et des formulaires ont été créés, pour faciliter la saisie des données. Un extrait de la base est disponible en Annexe 3.

J'ai réalisé l'intégralité de la base de données et de la saisie des données sur le sol.

4. Méthode d'analyse des données

Près d'une centaine de paramètres ont été obtenus (terrain et laboratoire). Cependant, la taille réduite de l'échantillon ne permet pas de les prendre tous en compte dans un même GLM (Modèle Linéaire Généralisé). Ainsi, les premières analyses ont été restreintes aux principaux indicateurs utilisés en agriculture pour matérialiser la fertilité d'un sol et enrichies par des paramètres liés au contexte des toitures végétalisées [Johan, 2017]. Finalement, seize paramètres ont été sélectionnés :

- **conception** : Surface (m²), Hauteur (m), Age (années) ;
- **gestion** : Irrigation (pluie = 0, arrosage = 1) et Intervention (0 = jamais, 1 = contrôle pour préserver l'étanchéité, 2 = fauche ou tonte) ;
- **état du substrat** : Epaisseur moyenne (cm), Teneur en éléments grossiers (%), Rapport C/N, Azote (%), Matière Organique (%), Capacité d'échange Cationique (még/100g), Somme des ratio d'ETM (somme des sept ratio), pH, Teneur en argile et en sable (%).

Pour des questions de variabilité de teneur en éléments grossiers entre les substrats, les teneurs en sable et en argile sont rapportées au volume total en prenant en compte la teneur en éléments grossiers.

Quatre variables sont intéressantes à étudier en relation avec les paramètres du substrat. La **biomasse microbienne** est la fraction vivante de la matière organique contenue dans les substrats. Elle remplit de nombreuses fonctions dans les sols agricoles (minéralisation, nitrification etc.). La **richesse floristique** qui utilise le sol comme support et pour son alimentation. De plus, les plantes et le sol interagissent entre eux. La **rétenction en eau** et le **stockage en carbone** sont des fonctions remplies par le substrat. Pour les GLM, seules les variables biologiques sont étudiées.

a. Corrélation entre les variables

Les variables corrélées à plus de 0,7 selon la méthode de Spearman, ne peuvent pas être mises ensemble dans un même GLM. Seules les variables les plus pertinentes pour les toitures végétalisées sont conservées. La teneur en argile, la CEC et l'azote sont écartées.

b. Analyse des composantes principales

Pour étudier la richesse floristique et la biomasse microbienne, une analyse en composantes principales (ACP) est réalisée à l'aide du **package ade4 sur le logiciel R** (graph des éboulis, cercle des corrélations). Une variable qualitative comme le Type de toiture, la Strate Végétale Dominante ou la nature du substrat peut conditionner l'ACP. Deux hypothèses s'offrent à notre analyse :

- Une combinaison de variables décrit relativement bien un axe et une variable qualitative représente cet axe. La combinaison de variables est remplacée par les coordonnées des individus de l'axe concerné ;
- Les variables participant peu à la description des premiers axes sont mises de côté.

L'objectif est de réduire le nombre de variables à utiliser dans le modèle linéaire tout en conservant le maximum de variance offert par le nuage de points.

c. Modèle linéaire généralisé (GLM)

Les paramètres conservés, après les étapes précédentes, sont utilisés pour les modèles linéaires généralisés (GLM). Une vérification de la colinéarité est réalisée au seuil de 0,5 selon le scientifique Freckton. La distribution de la variable à expliquer définit le type de famille soit :

- une loi de poisson pour la richesse floristique (donnée de comptage, valeur positive) ;
- une loi normale pour le log de la biomasse microbienne (courbe gaussienne et test de Shapiro).

Le modèle complet prend en compte l'ensemble des variables retenue grâce à l'ACP. Les variables non significatives sont éliminées une à une en commençant par la p-value la plus grande. Le modèle final doit respecter deux principes fondamentaux :

- vérifier l'indépendance des variables : un test de multi-colinéarité est réalisé ;
- éviter si possible le sur-paramétrage : le nombre de variables ne représenter plus de 10 % des individus. Avec 30 toitures, seulement 3 à 4 variables peuvent-être conservées.

La normalité des résidus est vérifiée par Q-Q Plot. Pour les représentations graphiques, la richesse floristique et la Biomasse microbienne sont représentées par leurs **résidus**, c'est-à-dire que l'**effet obtenu est indépendant des variables** du modèle.

d. Calcul de la rétention en eau et du stock de carbone

La rétention en eau de la toiture est obtenue par les étapes suivantes :

- **Rétention en eau par unité de surface (L/m²)** soit le volume de terre par m² multiplié par la Rétention maximale en eau à CME avec :

$$\text{Volume de terre} = \frac{(\text{Profondeur en mètre} \times 1000 \text{ L})}{(1 \text{ m}^2)}$$

- **Rétention en eau totale (L/toiture)** est le produit de la rétention par unité de surface et de la surface. Les mesures en L/m² sont convertie en m³

La même démarche est effectuée pour estimer le stock de carbone en 2018. La teneur en Carbone est exprimée en g/kg elle est divisée par la densité apparente afin d'obtenir du carbone en g/L.

Pour rappel :
1 m³ = 1000 L et 1 tonne = 1000 kg

Résultats et Analyses

1. Présentation des 30 toitures végétalisées

Pour simplifier, les toitures sont identifiées par un acronyme (se reporter au tableau Annexe 1 pour la correspondance et les fiches de description associées). Sur le terrain, l'hétérogénéité des toitures végétalisées est flagrante. L'étude comparative du **système de conception**, de la **strate végétale**

dominante et de la **nature du substrat** (Fig. 7) montre que le système de conception influence la strate végétale dominante et la nature du substrat en place

Focus sur le pilotage de l'étude pour l'année 2018 :

La collecte de données s'est déroulée du **3 avril 2018 au 20 juillet 2018**. L'équipe naturaliste dispose de 8 à 10 journées de terrain par item (substrat, flore et arthropodes) étalées sur 3 à 4 semaines. Le planning prend en compte la proximité géographique et la disponibilité des gestionnaires, afin de réaliser quatre à six toitures par jour. Selon les toitures, les équipes sont composées de 2 à 8 personnes (internes et partenaires, Fig. B). Les protocoles « arthropodes » sont reprogrammés si les conditions météorologiques ne sont pas favorables à leur observation (Température supérieure à 18°C, absence de vents et de pluie)



Figure B Toiture rue Faubourg du Temple avec une équipe de 5 personnes.

Mon travail de pilotage :

- choix des analyses de sols à effectuer avec l'appui de Marc Barra ;
- préparation du matériel pour les protocoles et étiquetage des échantillons ;
- planification des quatre passages en accord avec le planning des équipes avec l'appui de Gilles Lecuir ;
- prise des rendez-vous auprès des gestionnaires et compléments d'informations (mail et téléphone) ;
- traçabilité de l'étude (date de passage, cartographie des substrats) ;
- gestion client avec Auréa avec l'appui de Marc Barra.

Récapitulatifs de la campagne 2018 :

- Trente toitures végétalisées ont été prospectées pour les substrats en Île-de-France, soit :
- 300 prélèvements de terre réalisés (soit 390 tubes de 15 mL remplis, 120 à 180 Litres de substrats transportés et expédiés) + 30 fiches de terrains remplies ;
 - 10 jours de prélèvements de substrat, en binôme avec M. Barra ou J. Flandin ;
 - 15 jours de création de la base de données, 20 jours de saisie de données ;
 - 30 gestionnaires contactés pour les prises de rendez-vous et les compléments d'informations ;
 - 2 à 8 personnes par équipes terrains à coordonnées sur les toitures (Fig. B)

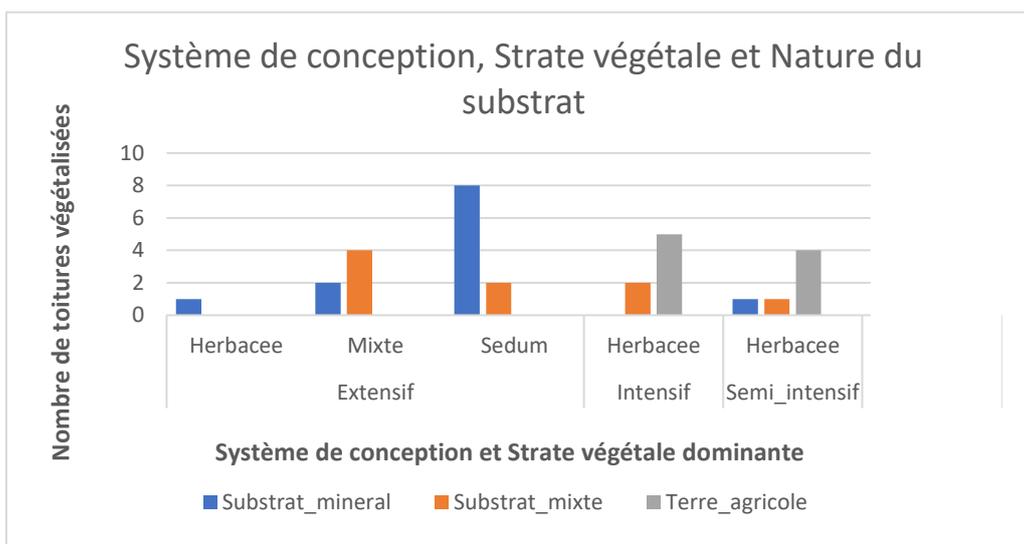


Figure 7 : Etude comparative du système de conception, de la strate végétale dominante et de la nature du substrat. Les toitures intensives et semi-intensives ont une strate dominante herbacée et un substrat agricole. Alors que les toitures extensives composées principalement de substrat minéral peuvent être plantées d'Orpins et/ou d'herbacées. Les substrats mixtes ne semblent pas associés à un système de conception ou une strate végétale particulière

- **Système de conception**

La faible **portance des bâtiments existants**, implique la mise en place de toitures extensives avec un substrat léger (principalement en pouzzolane) et souvent de faible épaisseur. (Fig. 8). Au contraire, les **nouveaux projets urbains** privilégient les toitures de types intensives, avec des épaisseurs de substrat plus importantes, souvent supérieures à 20 cm (Fig. 8).

- **Strate végétale dominante**

La végétation présente sur les toitures extensives est **diversifiée** : une toiture herbacée, six en végétation mixte et dix en orpins (Fig. 7 et Fig. 9). Les toitures à base d'orpins restent majoritaires pour ce système de conception. En revanche, les toitures semi-intensives et intensives sont **exclusivement** composées d'une strate herbacée et rarement arbustive.



Figure 8 : En haut FONTA créée en 2018 sur une toiture existante et en bas SEINE créée en 2018 sur une nouvelle construction



Figure 9 : Diversité des toitures extensives (avec de gauche à droite : Végétation Orpins (LUAUB), Végétation Mixte (CARON) et Végétation Herbacée (GOOPL) © Audrey Muratet, Marc Barra et Jonathan Flandin

- **Nature du substrat**

Le **substrat minéral** est associé aux toitures extensives (onze) alors que les toitures intensives et semi-intensives sont composées de **terre agricole** (Fig.10). Les substrats mixtes se retrouvent pour les trois systèmes de conception. **Le système de conception de la toiture influence le choix du substrat : soit pour les toitures extensives des substrats minéraux à base de pouzzolane et enrichis parfois en sable soit pour les toitures intensives des substrats à base de terre agricole.**

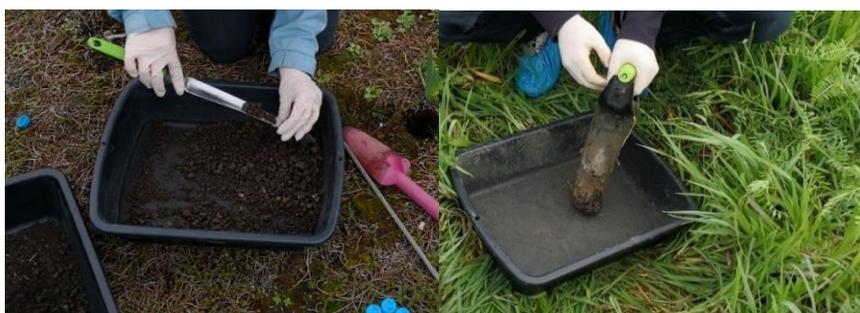


Figure 10 : Différences de substrat employés sur les toitures végétalisées, A gauche pouzzolane sur toiture extensive (CIMOD) et à droite terre agricole employé sur une toiture semi-intensive (ALBAR) © Marc Barra et Adeline Decourcelle

2. Les paramètres choisis (sur 24 toitures)

Six échantillons sont encore en cours d'analyses (ECOBIO, FONTA, LUAUB, PERIS, ROROL et SEINE). Ainsi, la suite des analyses portera seulement sur **24 toitures végétalisées** soit 13 toitures en extensives, 6 en semi-intensives et 5 en intensives. Sur le terrain, les toitures végétalisées sont visuellement très hétérogènes (forme, surface, composition végétale ou encore nature de leur substrat). Cette hétérogénéité est confirmée par les écarts-types obtenus sur les 24 toitures : Surface : ± 623 m², Age : ± 17 ans, Hauteur : ± 7 m, Profondeur substrat : $\pm 14,54$ cm (tableau 2). Cette variabilité se retrouve également pour chaque système de conception des toitures végétalisées (extensive, semi-intensive et intensive).

Tableau 1 : Résumé des données des 24 toitures (Min, Max, Moyenne et Ecart-type) et pour chaque système de conception (moyennes et écarts-types). Une grande hétérogénéité des paramètres, transparait avec les écart-types.

	Min	Max	Moyenne (24 toitures)	Ecart-type (ET) (24 toitures)	Moyenne Intensive	ET Intensive	Moyenne Semi- Intensive	ET Semi- Intensive	Moyenne Extensive	ET Extensive
Surface (m ²)	91	2980	666	623	837	334	365	250	739	787
Age (année)	2	58	13	17	19	18,91	3	1	15	19
Hauteur (m)	3,68	30	11	7	14	11	9	5,85	10	5,65
Epaisseur (cm)	5,00	56,00	18,65	14,54	40,82	9,35	24,44	6,07	7,46	1,92
pH eau	6,31	8,53	7,66	0,58	7,91	0,39	7,96	0,39	7,43	0,64
CEC (méq/100g)	6,08	42,97	19,98	8,90	20,35	7,64	13,45	4,79	22,85	9,63
Ratio ETM total	95	644	220	122	268,53	215,16	231,08	147,11	197,2	51,45
Teneur en éléments grossiers (%)	1,93	76,42	28,36	20,90	6,27	6,70	24,42	19,87	38,68	18,21
Rapport C/N	5,49	25,40	12,7	4,90	11,71	2,06	13,64	3,62	13,49	6,18
Teneur argile (%)	0	18,93	6,60	6,58	15,55	4,13	9,07	6,12	2,00	1,59
Teneur sable (%)	17,44	61,49	42,42	13,20	35,67	13,17	39,07	13,18	46,57	12,67
MO (%)	2,30	15,40	8,27	4,03	7,76	4,53	4,88	1,78	10,03	3,72
Azote (%)	0,82	2,86	10,16	2,41	3,45	1,64	2,46	1,31	4,14	2,92

Les valeurs de **pH** eau sont globalement neutres avec une **légère tendance à des pH alcalin** (calcaire). Pour les toitures extensives la gamme s'étend de 6,31 à 8,40 contre 7,42 à 8,47 pour les intensives. Ces valeurs de pH sont proches de celles recommandées par la FLL : soit entre 6,5 et 8 pour les toitures extensives et entre 5,5 et 8 pour les intensives [Fournier, 2016].

La **Capacité d'Echange Cationique** est en moyenne **très inférieure pour les toitures semi-intensive (13,45 méq/100 g)** contre plus de 20 méq/100g pour les autres toitures.

Le **ratio total d'Eléments Traces Métalliques (ETM)** montre que les toitures intensives (268) et semi-intensives (231) sont en moyenne plus polluées que les toitures extensives (197). Cependant, leurs écarts-types sont respectivement de 215, 147 et 51 ce qui laisse transparaitre **une grande hétérogénéité des pollutions aux ETM sur les toitures**

végétalisées. Une étude scientifique a montré la capacité des substrats à retenir les ETM présents dans les eaux de pluie. [Schwager, 2013]

La **teneur en éléments grossiers** est plus importante pour les toitures extensives en moyenne 38,7 % contre 6,27 % pour les toitures intensives. La gamme de valeurs s'étend de 14,54 à 76,42 % pour les extensives et de 2,24 à 18,12 % pour les intensives. **Ces valeurs sont inférieures à celles mesurées à Genève** soit 80% d'éléments grossiers pour les toitures extensives et 37% pour les intensives [Fournier, 2016].

Le **rapport C/N** varie assez peu pour les toitures intensives (2 points) avec une moyenne de 11,7, tandis que les toitures extensives ont une moyenne de 13,5 (6 points). Pour les toitures extensives les valeurs varient de 5,49 à 25,40

La **teneur en argile** est plus importante pour les toitures intensives que pour les extensives et inversement pour la **teneur en sable**. Ceci est en accord avec les observations de terrain. Ainsi, le **choix du substrat est influencé par le type de toiture végétalisées.**

La teneur en matière organique (MO) varie de 4,00 à 15,40 % pour les toitures extensives et de 3,20 à 14,20 % pour les intensives. Selon les prescriptions de la FLL les teneurs en MO sont de 6 à 8 % pour les toitures extensives et de 6 à 12 % pour les intensives [Fournier, 2016]. **Huit toitures extensives dépassent ces prescriptions soit une sur**

deux. Ces prescriptions ne sont pas données pour les besoins nutritifs mais pour limiter les risques d'incendies. [Damas, 2013]

La **teneur en azote** varie de 0,82 à 10,16 % pour les extensives et de 1,50 à 5,89 % pour les intensives. La variation pour les toitures extensives est plus importante que pour les toitures intensives.

3. Les services étudiés (sur 24 toitures)

Les services étudiés (rétention maximale en eau et teneur en carbone) et les mesures de biodiversité (richesse floristique et biomasse microbienne) ont également une **variance importante** (Tableau 3)

La **richesse floristique est en moyenne plus élevée pour les toitures intensives** (26 plantes) que les toitures extensives (17 plantes). Elle varie de 12 à 33 plantes pour les intensives, de 7 à 36 plantes pour les semi-intensives et de 5 à 31 plantes pour les extensives. Au vu de ces résultats, la faible profondeur de substrats des toitures extensives peut



Figure 11 : Toiture Extensive à dominante herbacée (CARON) avec une richesse de 31 espèces de plantes

permettre d'accueillir une flore diversifiée. C'est le cas de la toiture de CARON qui possède un cortège de plantes de 31 espèces (orpins et autres herbacées, Fig. 11)

La **biomasse microbienne** (en mgC / Kg) varie de 358,0 à 948,0 mgC / Kg pour les toitures intensives, de 210,0 à 943,0 mgC / Kg pour les semi-intensives et de 210,0 à 1344,0 mgC / Kg pour les extensives. Elle est **en moyenne plus élevée pour les toitures intensives** (612,5 mgC / Kg) que les toitures extensives (572,2 mgC / Kg) et que les toitures semi-intensives (419,0 mgC / Kg).

La **Rétention Maximale en Eau (RME)** varie de 42,78 à 53,98 % pour les intensives, de 21,54 à 50,98 % pour les semi-intensives et de 24,03 à

50,49 pour les extensives. Elle est **en moyenne plus élevée pour les toitures intensives** (49,43 %) que les toitures extensives (40,12 %).

La **teneur en carbone** varie de 18,80 à 82,40 gC/Kg pour les intensives, de 13,50 à 41,30 gC/Kg pour les semi-intensives et de 23,50 à 89,40 gC/Kg pour les extensives. Elle est **en moyenne plus élevée pour les toitures extensives** (58,23 gC/kg) que les toitures intensives (45,14 gC/Kg).

Les toitures intensives semblent en moyenne mieux répondre à l'accueil de la biodiversité et à la rétention en eau, alors que les toitures extensives auraient un stock de carbone plus important.

Tableau 2 : Résumé des variables à expliquer pour les 24 toitures végétalisées étudiées (Min, Max, Moyenne et Ecart-type) et sur les types de toitures (moyenne et écart-type), * La

	Min	Max	Moyenne (24 toitures)	Ecart-type (24 toitures)		Moyenne Intensive	ET Intensive	Moyenne Semi- Intensive	ET Semi- Intensive	Moyenne Extensive	ET Extensive
Richesse Floristique (ind)	5	36	19	9		26	8	22	10	17	7
Biomasse microbienne (mgC/kg)	210,0	1344,0	555	317		572,2	223,2	419,0	264,8	612,5	366,1
Rétention max eau à CME (%)*	21,54	53,98	42,72	9,42		49,43	4,51	42,34	10,65	40,12	NA
Carbone (g/kg)	13,50	89,40	48,04	23,38		45,14	26,27	28,37	10,33	58,23	21,52

rétention maximale en eau à CME porte sur 22 toitures (manque les analyses physiques de PAREX et PROMA)

4. Flore et Biomasse microbienne

a. Analyses en Composantes Principales (ACP)

L'Axe 1 explique 27,48 % de la variance du nuage de points. Il semble assez bien décrit par cinq variables (en vert) : le **pH**, la **profondeur moyenne**, **Irrigation**, la **Matière organique** et le **refus 2 mm** (Fig. 12). L'axe 2 explique 18,80 % de la variance du nuage de points. Il semble assez bien décrit par deux variables (en bleu) : le pourcentage en sable et l'intensité de la gestion (= intervention).

La confrontation des 16 paramètres aux trois variables qualitatives sélectionnées (Type de toiture [Fig. 13.a], Strate végétale dominante [Fig. 13.b] et type de substrat [Fig. 13.c]) montre qu'il y a un gradient des toitures le long de l'axe 1 représentant un **gradient d'intensification**. Ce gradient reflète bien le **système de conception** (Fig. 13.a), les choix de substrat qui lui sont associés soit épaisseur et teneur en élément grossier et l'irrigation.

Par la suite les variables : pH, profondeur moyenne, Irrigation, Matière Organique et refus 2 mm seront représentées par les coordonnées des individus de la dimension 1, soit **Dim1 ACP**.

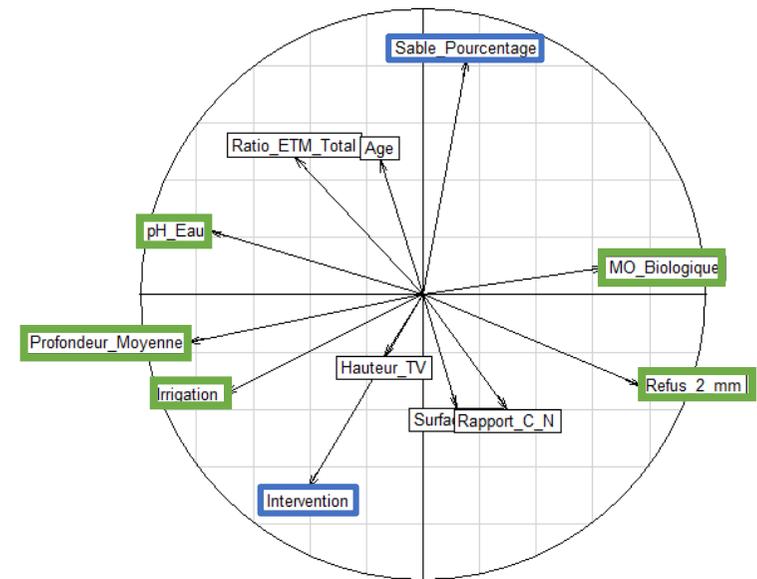


Figure 12 : Analyse des composantes principales (ACP) de 16 paramètres pour 24 toitures végétalisées. Avec en vert les variables participant à la construction de l'axe 1 et en bleu celle constituant l'axe 2

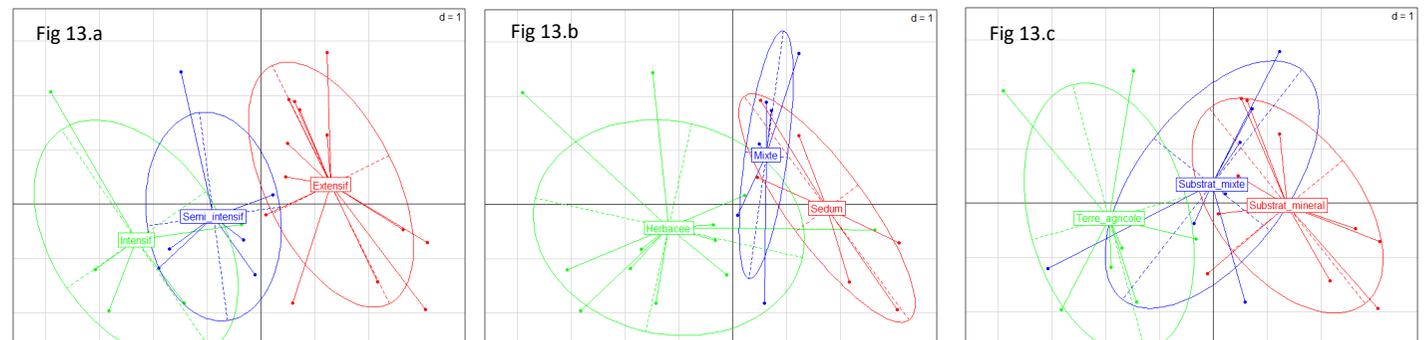
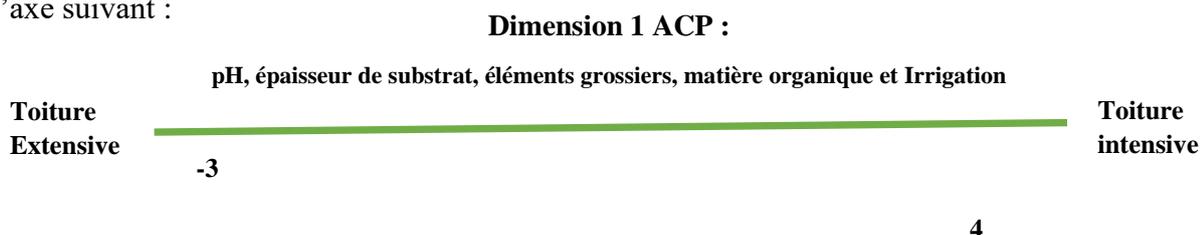


Figure 13 : Résultat de l'ACP et représentation d'une variable qualitative. Fig 13.a : Système de conception, Fig 13.b : Strate végétale dominante, Fig 13.c Type de substrat. Ces trois variables qualitatives suivent un gradient le long de l'axe 1

b. Les modèles linéaires généralisées

Les premiers modèles linéaires généraux pour la richesse floristique est la biomasse comporte les variables suivantes : Teneur en Sable, Ratio ETM, Age, Surface, Rapport C/N, Gestion et Dim 1 de l'ACP. Pour répondre à la contrainte de sur paramétrage les variables non significatives sont retirées une à une en commençant par la p-value la plus élevée (Voir Paragraphe en Matériel et méthodes, 4.c.).

Pour rappel, la dimension 1 re présentant le gradient d'intensification regroupe cinq paramètres selon l'axe suivant :



Les modèles linéaires généraux finaux, sont :

- Richesse floristique ~ Dim1 ACP + Gestion + Rapport C/N + Teneur en sable (1) ;
- Log (Biomasse microbienne) ~ Dim1 ACP + Rapport C/N (2).

Pour le modèle (1), **quatre paramètres** influencent la richesse floristique. Le plus significatif est la **dimension 1** (p-value de 0,00669) (Tableau 3). Néanmoins, **le modèle (1) explique seulement 17 %** de la variance de l'échantillon (nuage de points). D'autres paramètres sont à considérer dans le modèle, comme les éléments nutritifs ou les variables biologiques (Biomasse microbienne, minéralisation du carbone, mycorhize, etc.).

Pour le modèle (2), **deux variables** sont significatives pour la biomasse microbienne. Le plus significatif est le **rapport C/N** (p-value de 0,000246) (Tableau 3). Ce modèle explique 49 % de la variance de l'échantillon. D'autres variables comme la porosité, la CEC, le calcium peuvent influencer la biomasse microbienne [Lechevallier, 2004].

Tableau 3 : Résultats des modèles linéaires généralisées pour la richesse floristique et la biomasse microbienne, reprenant l'estimation, l'erreur standard et la p-value de chaque paramètre. Quatre paramètres sont significatifs pour la richesse spécifique en plantes contre deux pour la biomasse microbienne.

Paramètres	Richesse floristique		Biomasse microbienne	
	Estimation/ Erreur Standard	P-value (*/**/***)	Estimation/ Erreur Standard	P-value (*/**/***)
Intercept	3,226621 0,254031	< 2e-16 ***	7,17376 0,23694	2e-16 ***
Dim1 ACP	0,077155 0,02844	0,00669 **	0,09689 0,04499	0,043064 *
Gestion	-0,133170 0,064957	0,04035 *	NC	NC
Rapport C/N	0,020672 0,010487	0,04871 *	-0,07493 0,01701	0,000246 ***
Teneur en Sable	-0,009422 0,003907	0,01588 *	NC	NC

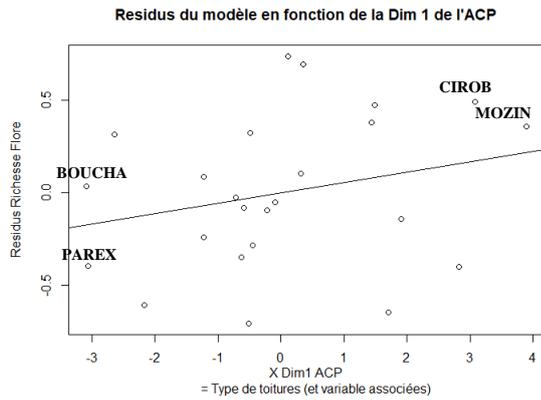


Figure 14 : Représentation des résidus de la richesse floristique en fonction de la dimension 1 de l'ACP. Les toitures « intensives » semblent favorables à cette richesse

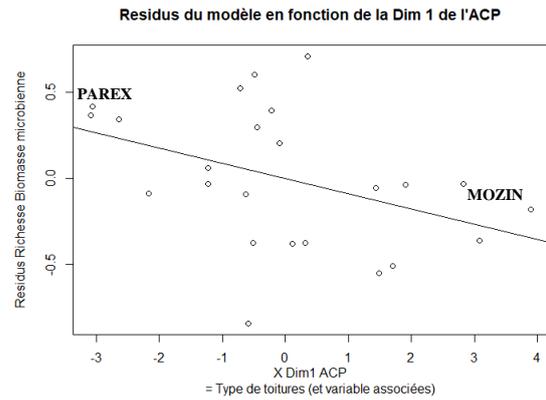


Figure 15 : Représentation des résidus de la biomasse microbienne (BM) en fonction de la dimension 1 de l'ACP. Les toitures extensives semblent favorables à cette BM

La dimension 1 agit **positivement** sur la richesse floristique (Fig. 14). Cette dernière serait favorisée par les toitures de type « intensive ». Par exemple, la toiture MOZIN a une épaisseur de 56 cm, 4,8 % de MO et 5,05 % d'éléments grossiers (Fig. 16). Pour la biomasse microbienne l'effet est contraire (Fig. 15). Celle-ci serait favorisée par les toitures de types « extensives ». Par exemple, la toiture PAREX à une profondeur de 5 cm, 15,4 % de MO et 60,09 % d'éléments grossiers (Fig. 16).



Figure 16 : En haut la toiture de MOZIN avec une richesse floristique de 22 espèces et en bas la toiture de PAREX avec une biomasse microbienne de 898 mgC/kg

Ainsi, la flore et la biomasse microbienne semblent avoir des besoins écologiques différents.

L'étude séparée des cinq paramètres contenus dans la dimension 1 montre que la richesse floristique est principalement influencée par l'épaisseur de substrat (Fig. 17). La biomasse microbienne dépend principalement de la teneur en matière organique. (Fig. 17)

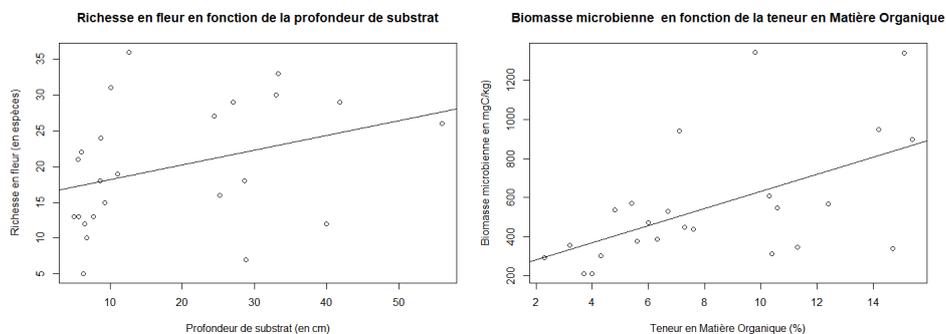


Figure 17 : A gauche : la richesse floristique exprimée en fonction de l'épaisseur de substrat, cette richesse augmente avec l'épaisseur de substrat A droite la Biomasse Microbienne en fonction de la teneur en MO, cette biomasse est favorisée par une teneur en MO élevée

Pour le **rapport C/N**, la même tendance est observée. La richesse floristique semble être favorisée par un rapport C/N élevé (Fig. 19), c'est-à-dire une faible décomposition de la matière organique. Au contraire, la biomasse microbienne est favorisée par un rapport C/N faible (inférieur à 10, Fig. 20). Les terres riches en azote et MO fraîche stimulent l'abondance et l'activité microbienne d'un sol [Tardy, 2014]. C'est le cas des toitures de WWF et de GOOPL (Fig. 18). Ces deux toitures se trouvent dans le Bois de Boulogne et sont entourées de feuillus, ce qui pourrait expliquer leur enrichissement en azote. Hypothèse : **Les fonctions écologiques (richesse floristique et biomasse microbienne) des toitures végétalisées pourraient-êtr**



Figure 18 : Toiture de GOOPL dans le Bois de Boulogne, entouré par les feuillus. La chute des feuilles enrichie la toiture en MO fraîche qui se traduit par un rapport C/N plus faible

des toitures végétalisées pourraient-êtr

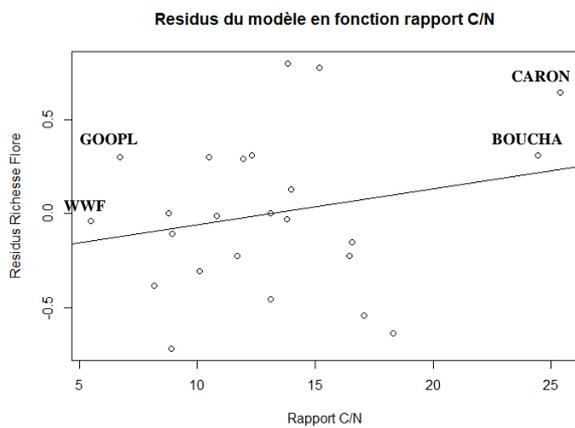


Figure 19 : Représentation des résidus de la richesse floristique en fonction du rapport C/N. L'augmentation du rapports C/N tend à améliorer cette richesse.

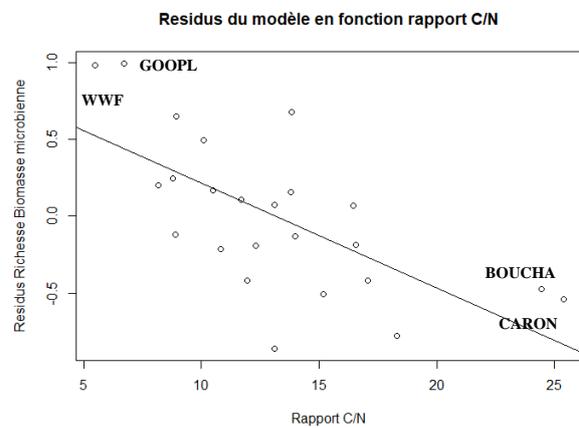


Figure 20 : Représentation des résidus de la biomasse microbienne en fonction du rapport C/N. L'augmentation du rapport C/N est défavorable à la biomasse microbienne.

La gestion des végétaux à un effet négatif sur la richesse floristique (Fig. 21). Nous pouvons formuler l'hypothèse suivante : **la gestion des toitures végétalisées défavorise l'implantation d'espèces spontanées.**

La richesse floristique des toitures CARON (31 espèces), GTMBA (36 espèces) et CIROB (33 espèces) s'explique par des choix de conception (prairie sur les toits, toiture vitrine, espace vert). Au contraire les toitures de ANTHEU (5 espèces), EIDER (10 espèces) et FRANK (7 espèces) subissent des pressions extérieures (déchets, enclave, fauche en juillet).

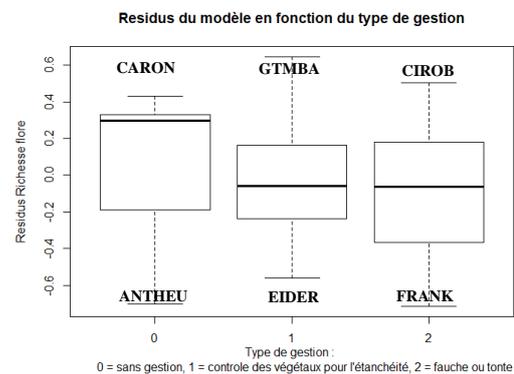


Figure 21 : Représentation des résidus de la richesse floristique en fonction du type de gestion. L'absence de gestion favoriserait cette richesse

Ce résultat suggère que la gestion des toitures végétalisées n'est pas nécessaire, contrairement aux préconisations de la profession. L'instauration de pratiques de gestion alternative plus douces, comme l'arrachage sélectif, permettraient l'installation des espèces spontanées.

Par ailleurs, une toiture végétalisée dite « intensive » par la profession ne nécessite pas forcément une gestion. Les gestionnaires l'ont bien compris. Ainsi, les toitures « intensives » de SEINE et ALBAR ne sont pas gérées et possèdent respectivement 45 et 29 espèces de plantes.

Les pratiques de gestion couramment associées à la classification des toitures végétalisées par l'ADIVET sont remises en cause par le projet GROOVES. Cependant, la prise en compte de l'épaisseur de substrat est un critère fondamental pour l'installation d'une strate végétale diversifiée.

5. Rétention maximale en eau d'une toiture végétalisée

a. Paramètres physiques influençant la Rétention Maximale en Eau

La Rétention Maximale en Eau (RME) est le teneur en eau stockée après saturation du substrat et un ressuyage de 2 heures. Cette Rétention Maximale en Eau dépend du type de toiture (Fig. 22). Pour un même volume, les toitures intensives retiennent plus d'eau que les toitures extensives, soit respectivement une RME de 49,43 % contre 40,12% en moyenne. Il faut noter que les valeurs obtenues sont mesurées sur des **substrats remaniés**. Ces données sont une estimation de la capacité des substrats à retenir l'eau.

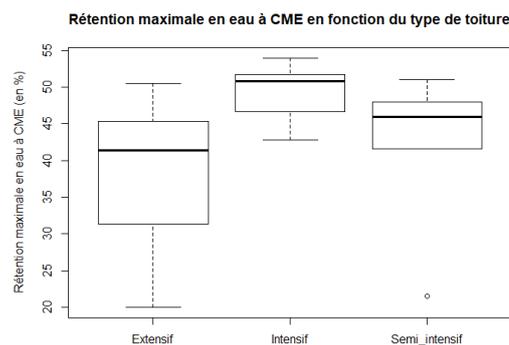


Figure 22 : Représentation de la Rétention Maximale en Eau en fonction du type de toiture Végétalisée. La RME est en moyenne inférieure à celle des extensives.

La teneur en éléments grossiers est plus importante pour les toitures extensives (38,68%) que les intensives (6,27%) (Fig. 23). Les substrats en pouzzolane sont privilégiés pour faciliter la percolation de l'eau. Cette faculté est conservée en disposant des feutres pour éviter le colmatage par les éléments fins comme les argiles. La porosité en air à la Capacité Maximale en Eau (CME, Fig. 23) confirme cela. Ainsi, les toitures extensives ont une macroporosité plus importante qui accueille de l'air au détriment de la rétention en eau. Néanmoins, ce constat est en accord avec les préconisations pour limiter la charge des toitures sur les bâtiments. **La nature du substrat influencerait la rétention en eau.**

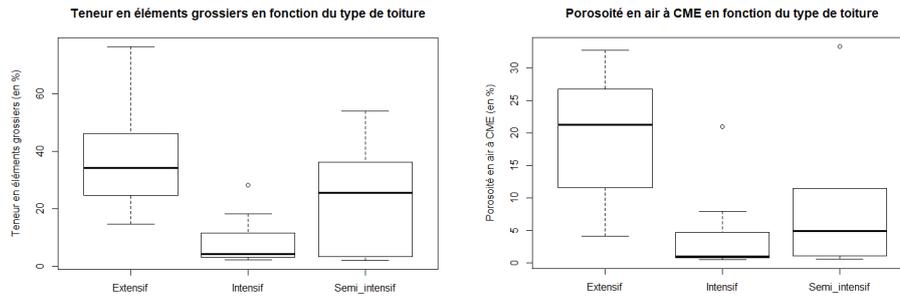


Figure 23 : A gauche : Teneur en éléments grossiers en fonction du type de toiture, A droite : Porosité en air à CME en fonction du type de toiture. Pour les deux les toitures extensives ont des moyennes significativement supérieures à celles des toitures intensives

b. Calculs de la rétention en eau sur substrat remanié

La rétention maximale en eau des substrats varie de 21,54 à 53,98% (barre orange, Fig. 24). Nous considérons par la suite que cette valeur est uniforme en tout point de la toiture (profondeur et surface). Le graphique ci-dessous (Fig. 24) représente l'épaisseur de substrat (points bleus) et la rétention en eau par m² (barres grises)

Les toitures avec une épaisseur inférieure à 12 cm stockent au plus 50 L d'eau/m² tandis qu'une toiture avec une épaisseur de 40 cm peut stocker environ 200 L d'eau/m². **L'épaisseur est déterminante pour favoriser la rétention en eau d'une toiture végétalisée**

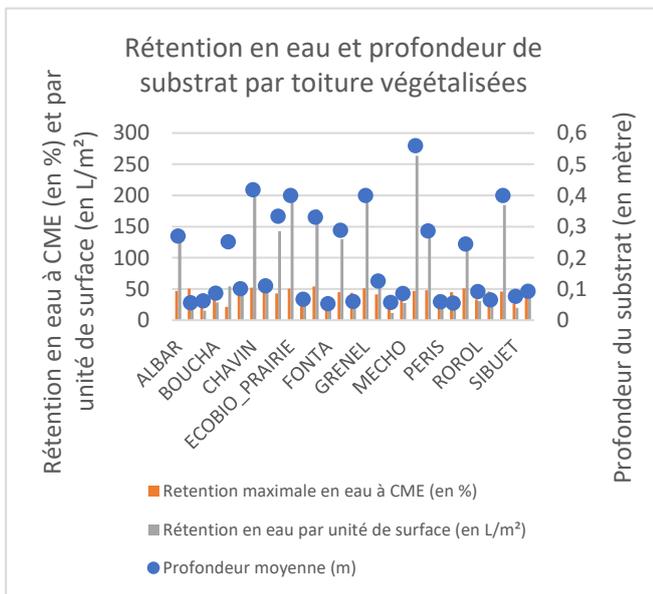


Figure 24 : Rétention en eau et profondeur de substrat avec en orange la RME, en bleu la profondeur et en gris la rétention en eau par m². Profondeur et rétention en eau sont corrélée

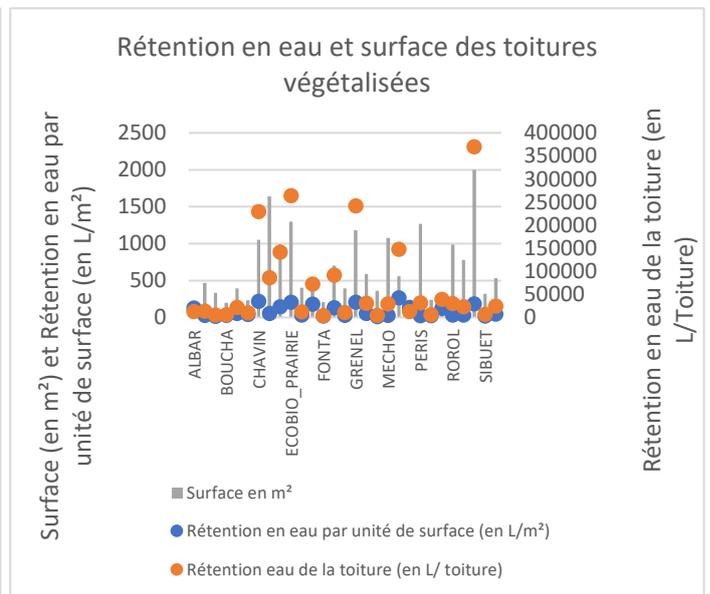


Figure 25 : Rétention en eau et surface avec en gris la surface, en bleu la rétention en eau par m² et en orange la rétention en eau de la toiture. La surface joue sur la rétention en eau mais dans une moindre profondeur.

Le graphique ci-dessus (Fig. 25) représente la surface de la toiture (barres grises) et la rétention d'eau de chaque toiture (points orange). Nous constatons que la rétention en eau par unité de surface (L/m²)

influence la rétention en eau globale de la toiture. Une toiture extensive comme CIMOD avec une surface de 1640 m² retenant 52 L/m² peut stocker au maximum 86 000 L d'eau (Fig. 26) tandis qu'une toiture intensive comme FRANK avec une surface de 702 m² retenant 129 L/m² peut stocker 92 000



Figure 26 : A gauche une toiture d'une épaisseur de 11 cm retenant 86 000 L d'eau pour 1640 m² (CIMOD), A Droite une toiture de 29 cm d'épaisseur retenant 92 000 L d'eau pour 702 m² (FRANK)

L d'eau au maximum (Fig. 26). **La prise en compte de la surface est importante. Dans les milieux urbains l'augmentation de l'épaisseur des substrat reste l'atout majeur pour la rétention en eau.**

Ce résultat pourrait être utile aux collectivités dans le cadre des stratégies d'adaptation au changement climatique. Ces villes pourront compter en partie sur la végétalisation des toitures en zones prioritaires (ruissellement) en adaptant le substrat à leur besoin de stockage. C'est-à-dire définir la nature du substrat et l'épaisseur en fonction de la surface végétalisable disponible.

6. Teneur en Carbone : stock au printemps 2018

Le teneur en carbone organique par unité de volume varie de 16,50 à 99,76 gC/L. Dans le graphique ci -contre (Fig 27), la teneur en carbone est représentée par les points bleus. Elle inclut la biomasse microbienne qui ne dépasse pas 1,5 gC/kg.

Cette quantité correspond au stock de carbone au moment du prélèvement de substrat. Pour étudier la fonction de stockage de CO₂, il faudrait réaliser un suivi temporel de l'évolution du stock de carbone dans le substrat et donc mesurer les flux de CO₂.

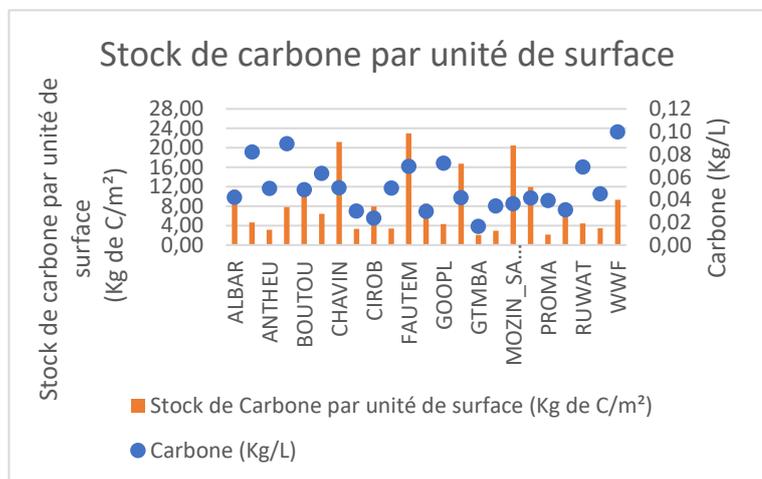


Figure 27: Stock de Carbone par unité de surface. Le Stock de Carbone au système de la Toiture en effet la teneur en carbone et le stock de carbone par unité de surface ne se superpose pas.

7. Bilan comparatif des fonctions écologiques et des services

Le tableau 5 reprend l'ensemble des fonctions écologiques et des services étudiés soit : la richesse floristique (en espèces), la biomasse microbienne (en mgC/kg), la rétention en eau par unité de surface (en L/m²) et pour la toiture (en m³) ainsi que le stock de carbone par unité de surface (KgC / m²) et par toiture (en Tonne de Carbone). Ces valeurs sont accompagnées des deux classifications vu précédemment (ADIVET et Madre). En bleu, sont répertoriés pour chaque variable les cinq toitures avec la valeur la plus élevée.

Tableau 4 : Tableau comparatif des fonctions écologiques et des services étudiés ainsi que des classifications sur le système de conception (ADIVET) et sur la strate végétale dominante (Madre). En bleu sont représenté le top cinq des toitures pour chaque paramètre

Nom Site	Richesse Floristique	Biomasse microbienne mgC	Rétention eau (en L/m ²)	Rétention eau total (m ³)	Carbone par (Kg de C/m ²)	Stock de Carbone total (Tonne de C)	Type Toiture	Strate végétale dominante
ALBAR	29	389	126,47	12,65	11,40	1,14	Semi intensif	Herbacée
AMROU	13	569	28,39	13,29	4,63	2,16	Extensif	Mixte
ANTHEU	5	440	15,01	5,05	3,12	1,05	Extensif	Orpins
BOUCHA	24	341	28,63	5,73	7,77	1,55	Extensif	Orpins
BOUTOU	16	943	54,29	21,50	12,30	4,87	Semi intensif	Herbacée
CARON	31	313	41,10	9,66	6,40	1,50	Extensif	Herbacée
CHAVIN	29	948	218,16	229,07	21,19	22,25	Intensif	Herbacée
CIMOD	19	210	52,36	85,87	3,31	5,42	Extensif	Mixte
CIROB	33	358	142,45	141,17	7,95	7,88	Intensif	Herbacée
ECOBIO PRAIRIE	14	NA	203,17	264,12	NA	NA	Intensif	Herbacée
EIDER	10	347	30,39	12,28	3,39	1,37	Extensif	Orpins
FAUTEM	30	547	178,13	72,50	22,96	9,34	Intensif	Herbacée
FONTA	10	NA	16,61	3,49	NA	NA	Extensif	Orpins
FRANK	7	210	129,98	91,25	8,54	6,00	Semi intensif	Herbacée
GOOPL	22	1344	26,28	10,41	4,33	1,71	Extensif	Mixte
GRENEL	12	471	204,67	241,51	16,70	19,71	Intensif	Herbacée
GTMBA	36	292	52,40	30,92	2,08	1,23	Semi intensif	Herbacée
LUAUB	6	NA	11,49	4,14	NA	NA	Extensif	Orpins
MECHO	18	572	27,28	29,47	2,97	3,21	Extensif	Mixte
MOZIN	26	537	263,48	147,55	20,49	11,47	Intensif	Herbacée
OLSER	18	377	137,42	12,51	11,93	1,09	Semi intensif	Herbacée
PAREX	13	898	NA	NA	NA	NA	Extensif	Orpins
PERIS	11	NA	24,77	31,46	NA	NA	Extensif	Orpins
PROMA	21	448	24,64	5,84	2,16	0,51	Extensif	Orpins
PULMA	27	303	124,39	39,18	7,59	2,39	Semi intensif	Herbacée
ROROL	16	NA	30,53	30,10	NA	NA	Extensif	Orpins
RUWAT	12	610	29,70	23,17	4,48	3,49	Extensif	Mixte
SEINE	45	NA	184,66	369,34	NA	NA	Intensif	Herbacée
SIBUET	13	531	19,84	6,35	3,46	1,11	Extensif	Orpins
WWF	15	1340	45,28	24,09	9,28	4,94	Extensif	Mixte

Le service de rétention en eau est mieux assuré par des toitures intensives, même constat pour le stock de carbone. Les toitures intensives ont de meilleures capacités grâce à :

- l'installation d'une épaisseur de substrat conséquente (paramètre lié au volume) ;
- l'utilisation de substrat terreux soit plus de microporosités pour retenir l'eau.

La richesse floristique est plus importante sur les toitures à dominante végétale herbacées (trois sont intensives, une semi-intensive et une extensive), tandis que la biomasse microbienne ne semble pas influencée par la strate végétale dominante. Le système de conception n'est pas un frein pour remplir ces fonctions biologiques. Certaines toitures extensives rivalisent avec les toitures intensives.

Sans surprise, les toitures remplissant le mieux ces fonctions et services sont des toitures intensives dominées par les herbacées. Cependant, les services et les fonctions écologiques ne peuvent pas être réduits à l'une ou à l'autre des classifications (ADIVET ou Madre). Il est intéressant de considérer conjointement l'épaisseur de substrat et la strate végétale dominante.

Discussion et Ouverture

Les résultats obtenus dans cette étude apportent de nouvelles connaissances sur les toitures végétalisées en termes de services écologiques et fonctionnels. Des conseils auprès des collectivités ou les gestionnaires pourront être réalisés sur l'accueil de la biodiversité et la rétention en eau. Il est utile de pouvoir comparer notre travail à d'autres études similaires si possible, avec des contextes climatiques ou des réglementations différentes.

1. Élément de réponse à nos questions scientifiques

Dans cette étude préliminaire sur l'influence des indicateurs de sol sur les services et fonctions écologiques des toitures végétalisées, plusieurs questions ont été posées. Nous pouvons déjà apporter des éléments de réponses.

a) *Les substrats mis en place sur les toitures sont-ils les mêmes ?*

Non, les toitures végétalisées étudiées dans l'étude GROOVES ont une grande variabilité des paramètres de substrat (voir le tableau 2). Les écarts-types les plus importants sont pour le ratio ETM (122), la teneur en élément grossier (20,90%) et l'épaisseur de substrat (15,45 cm). Le pH et la teneur en azote varient assez peu avec des écarts-types respectifs de 0,58 et 2,4.

Ce constat confirme la diversité des substrats employés par les concepteurs : réemploi de terre agricole ou création de substrat minéral à base de pouzzolane. Dans une prochaine étude, nous pourrions nous intéresser à la provenance de ces substrats au travers de l'énergie grise (transport, coût de fabrication, etc.). Nous pouvons supposer que l'emploi massif de pouzzolane (roche volcanique) a un impact écologique sur les régions volcaniques d'où elles sont extraites.

- *La variabilité des paramètres de sol est-elle liée au système de conception définie par les professionnels (ADIVET) ou à la strate végétale dominante telle que proposée par F.Madre ?*

L'analyse en composantes principales a montré que le système de conception et la strate végétale dominante décrivent un gradient le long de l'axe 1 pour les variables étudiées. **Ainsi, les cinq variables : pH, épaisseur de substrat, teneur en matière organique, teneur en éléments grossiers et l'irrigation sont influencées par ces deux classifications.**

Nous avons montré que la nature du substrat est influencée par le système de conception : utilisation de substrat minéral pour les toitures extensives et de terre agricole pour les toitures intensives. Cette différence notable a été confirmée par l'étude de la teneur en éléments grossiers soit en moyenne 38,7% pour les toitures extensives contre 6,27% pour les toitures intensives.

- *La variabilité des paramètres du substrat influence-t-elle la biodiversité (richesse floristique et biomasse microbienne) ? D'autres paramètres liés à l'écosystème toiture végétalisée entrent-ils en jeu ?*

La variabilité de ces paramètres influence directement la richesse floristique et la biomasse. Nous avons conclu que :

- la richesse floristique augmente avec **l'épaisseur de substrat et une gestion limitée ;**
- la biomasse microbienne augmente avec la teneur en **matière organique.**

De plus, les toitures intensives ont une richesse floristique supérieure aux toitures extensives. Ces dernières restent principalement plantées de orpins donc il y a un effet de la strate végétale dominante.

Sur le terrain, nous avons pu observer des effets de la présence d'arbres (Fig. 28), d'éléments techniques ou de



Figure 28 : Effet de la présence d'arbres à proximité de la toiture (apport de matière organique fraîche, ombre) ménageant des stations favorables à l'installation d'une végétation variée sur les toits (Toiture spontanée dans le parc Georges Valbon) © Marc Barra

gouttières qui **modifient localement la composition végétale** (apport de matière organique fraîche,

ombre, fraîcheur ou humidité). L'environnement proche est donc un élément à considérer dans nos prochaines réflexions.

a) *Quelles sont les capacités de rétention en eau et de stockage en carbone des différents couples substrat-végétation ?*

Sur les toitures intensives la rétention en eau peut dépasser les **200 L/m²** pour une épaisseur de substrats de 40 cm environ. De tels volumes peuvent être stockés uniquement si le substrat a pu sécher entre deux périodes pluie. [Arias et al, 2017] Cette rétention en eau est améliorée par de faible teneur en éléments grossiers qui enrichis ces substrats en microporosités (rétention de l'eau par la force de capillarité).

Le stockage de carbone n'a pas pu être estimé en tant que telle. La valeur mesurée reflète donc le stock de carbone au printemps 2018 (moment du prélèvement).

2. Remise en perspective des résultats à l'échelle locale et globale

a. Richesse floristique, biomasse microbienne et toiture végétalisée

- Richesse floristique

En 2018, près de 200 espèces ont été répertoriées sur les toitures végétalisées avec en moyenne une **richesse floristique de 19 espèces par toiture**. Ce résultat est supérieur à la richesse observée dans les prairies urbaines (16 espèces avec le protocole de Florilège prairie urbaine) et tous les milieux confondus (7 espèces, protocoles Vigie Flore) [Johan 2017]. La richesse floristique est principalement influencée par une importante épaisseur de substrats et une faible gestion des végétaux.

- Biomasse microbienne

La biomasse microbienne d'un sol agricole est comprise entre 0 et 800 mgC/kg [Lechevallier et al. 2004]. Sur les toitures végétalisées, elle varie de 210 à 1344 mgC/kg avec une moyenne de 555 mgC/kg (écart-type de 317). Les toitures sont donc des substrats accueillant une biomasse microbienne non négligeable. De plus, les résultats préliminaires de l'INRA de Dijon sur les substrats 2017 montrent que :

- les toitures végétalisées accueillent une

biomasse équivalente à celle des sols d'une prairie (Fig. 29, comparaison de la biomasse microbienne de nos toitures à celle du RMQS : Réseaux de Mesures de la Qualité des Sols) ;

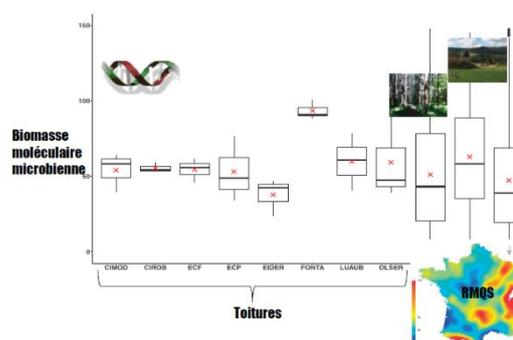


Figure 29 : Premiers résultats obtenus de l'analyse de l'ADN environnemental, par l'INRA de Dijon. Comparaison de la biomasse microbienne de nos toitures à celle du RMQS

- la diversité des communautés microbiennes dépend de la nature du substrat ;
- les substrats contiennent des actinomycètes. Ce sont des bactéries pouvant développer des hyphes et s'associer aux plantes (mycorhizes).

La biomasse microbienne est favorisée par un rapport C/N élevé et un substrat enrichi en matière organique. Ainsi, selon la thèse de V.Tardy, les sols riches en biomasse microbienne témoignent d'un apport récent de matière organique. Cette biomasse est alors principalement composée de bactéries alors que les sols à décomposition lente (C/N proche de 25) sont dominés par les champignons. **L'étude de l'ADN environnemental apportera des éléments de réponse sur l'activité et les fonctions remplies par la biomasse microbienne.**

b. Intensification et gestion des facteurs indépendants

Nous avons vu que les toitures intensives sans gestion peuvent accueillir une richesse floristique supérieure à 30 espèces végétales quelle que soit la surface. Ce résultat remet en cause les pratiques de gestion couramment associées au système de conception préconisées par les professionnels. **Les toitures intensives ne sont pas synonymes de gestion et d'irrigation.**

Les toitures à Orpins cultivées sur fibre coco accueillent moins d'une dizaine d'espèces. Les entreprises d'étanchéité proposant ce type de prestation « moquette », imposent des contrats d'entretien souvent onéreux afin de nettoyer les **bandes stériles**.

Ces bandes sont mises en place pour protéger l'étanchéité des racines. Une expérience est en cours de réalisation sur la toiture de GTM Bâtiment à Nanterre pour montrer l'inefficacité de ces bandes stériles. La réduction ou la disparition de ces bandes permet de maximiser l'espace consacré à la végétalisation et d'optimiser les fonctions d'accueil de la biodiversité et de rétention en eau.

De ce constat, les concepteurs et les gestionnaires de toitures végétalisées pourraient faire évoluer une partie de leur offre en intégrant les **préconisations suivantes** :

- installer une palette végétale mixte, avec des orpins et des herbacées. La diversification et l'adaptation de cette palette aux contextes des toits (forte amplitude thermique et en eau)



Figure 30: A gauche : Toiture à orpins (AMROU), la présence d'une gouttière crée un micro milieu (ombre et Humidité) qui favorise le développement des plantes. A droite : Toiture à orpins (SIBUET) même constat, l'ombre des tuyaux favorise le développement d'herbacées

rendrait les toitures végétalisées plus résilientes et réduirait l'arrosage ;

- installer une profondeur de substrat plus conséquente, soit au moins 12 cm ;
- limiter au maximum la gestion de la strate végétale, ou cibler les interventions sans affecter la dynamique biologique ;
- créer des micro-milieus (Fig. 30) en créant des modelés de terrains, de petites mares ou en installant du bois mort. Deux toitures vitrines sont visitables en îdF : GTM Bâtiment et au centre technique du Parc départemental de Georges Valbon.

c. Toitures végétalisées et services supports

- Rétention en eau

Nous avons montré que la rétention en eau était influencée principalement par l'épaisseur de substrat et la teneur en éléments grossiers. Cette capacité de stockage est influencée par la **saison** [Cuyper et Dinne, 2006] ainsi que le **type de végétation** et la **teneur en matière organique** [Ramier et al., 2013]. De plus, la performance hydrologique du substrat dépend du **degré d'assèchement du substrat**, soit la durée d'espacement entre deux pluies [Arias et al, 2017].

Au vu de nos résultats, nous souhaitons **créer un modèle simple** à destination des concepteurs de toitures végétalisées. L'objectif est de montrer l'influence des choix de conception sur la rétention en eau. Ce modèle se basera sur trois paramètres : l'épaisseur du substrat, la surface et la nature du substrat.

- Stockage de carbone

Une expérience réalisée dans le Michigan et le Maryland a montré qu'une toiture végétalisée peut stocker en moyenne 162 gC/m² en fonction du type de plante. [Getter et a, 2009]. Il serait intéressant de suivre l'évolution du carbone sur les toitures de l'étude GROOVES afin d'établir une comparaison.

3. Perspective 2019 pour le projet GROOVES

Nous verrons ici les prolongements possibles de mon travail sur les thématiques suivantes : flore, biomasse microbienne et rétention en eau.

a. Plantes : études des toitures spontanées et des mycorhizes

- Toitures spontanées ou Wild Roof

Une autre forme de végétalisation des toitures existe : les **toitures spontanées** ou Wild Roof. Cette végétalisation consiste à installer un substrat non planté ou des graviers en laissant les graines s'implanter et se développer spontanément afin de coloniser ce nouveau milieu.

En France, F.Madre de l'entreprise Topager réalise actuellement une étude scientifique sur ce nouveau concept : sa pertinence, sa faisabilité et son efficacité ainsi que de comprendre les différents vecteurs de dissémination des graines : le



Figure 31 : Toitures spontanées. En haut : toiture sur gravillon dans le parc Georges Valbon, En bas Wild Roof sur substrat à base de pouzzolane (GT MBA, Nanterre) © Marc Barra et Audrey Muratet

vent, la faune ou banque de graines du substrat. Deux toitures spontanées sont suivies par l'étude GROOVES (Fig. 31). Cependant, leur **faible effectif** n'a pas permis leur intégration à l'étude sur les substrats en 2018. Néanmoins l'intégration de ces toitures spontanées permettra d'étudier la dynamique naturelle de colonisation des toits par les plantes, les bryophytes et les mycorhizes.

Objectif : élargir le nombre de toitures « Wild Roof » afin de comprendre la dynamique de colonisation des toits et d'identifier les espèces adaptées et résilientes à ces milieux.

- Mycorhize

L'étude des mycorhizes par Laurent Palka et son équipe (MNHN) permettra de déterminer s'il existe ou non des **relations symbiotiques** sur les toitures végétalisées. Cette association plante/champignon permet d'augmenter le volume de sol prospecté par les racines et de capter les ressources disponibles. Les toitures végétalisées étant des systèmes relativement fermés (altitude, déconnexion au sol, etc.). On peut s'interroger sur l'effet à long terme de ces symbioses. L'équipe de Laurent Palka est en train de réaliser une étude sur la vitesse de mycorhization des plantes sur les toitures végétalisées du muséum.

b. Biomasse microbienne : Diversité et fonctions remplies

La mesure de biomasse microbienne par fumigation-extraction comporte des limites (les enzymes mesurées ne sont pas exclusivement produites par la biomasse microbienne, durée du processus) [Jenkinson et al.]. Des méthodes par PCR ont été développées à l'INRA de Dijon pour quantifier et étudier la richesse microbienne. Un essai de la méthode a été appliqué pour huit toitures végétalisées

du Projet GROOVES en 2017, par l'équipe de Pierre Alain Marron et Lionnel Ranjard avec des résultats concluants. Ceci montre une **variabilité des communautés en fonction de la nature du substrat**. De plus, les substrats examinés possèdent des **actinomycètes**, c'est-à-dire des micro-organismes capables d'établir des symbioses avec les plantes (mycorhizes) L'étude de l'ensemble des toitures permettra de confirmer ces résultats préliminaires. La diversité taxonomique permettra d'attribuer les fonctions écologiques remplies par chaque toiture comme par exemple la participation au cycle géochimique (carbone ou azote), la dégradation des ETM ou les symbioses avec les plantes.

c. Rétenion en eau : Mesures d'ETP et utilisation de l'outil FAVEUR

Des expériences menées en serre sur des substrats de toitures végétalisées ont montré que l'évapotranspiration des plantes est déterminée par la **taille des végétaux et leur biomasse** ainsi que par la **capacité de rétention en eau de la toiture** [Young, 2014]

Une première série de mesure de l'évapotranspiration (Fig. 32) de quatre toitures du projet GROOVES a été réalisée en juin par David Ramier du CEREMA (période de croissance des végétaux). Une deuxième série de mesure est réalisé courant septembre 2018.



Figure 32 : Matériel utilisé par David Ramier pour mesurer l'évapotranspiration sur les toitures, les mesures sont réalisées durant une journée

L'**outil Faveur** a été créé pour aider à la conception des toitures végétalisées ayant pour finalité de retenir l'eau. Il permet d'estimer à l'échelle d'un toit les volumes ruisselés après la rétention en eau par le substrat. [Berthier 2014]. Les données d'entrée sont le climat, l'épaisseur de substrat, la Rétention

Maximale en Eau et le type de végétation. Ce modèle sera utilisé dans l'étude en complément des volumes d'eau retenus sur les toitures végétalisées afin d'étudier globalement la thématique eau. L'obtention de ces données de ruissellement permettra de comparer le service rétention d'eau à la littérature existante.

d. Biais expérimental :

Cette expérience à grande échelle a pour but de récolter un maximum de données. Cependant, **l'échantillon reste petit**. Il est restreint à trente-cinq toitures végétalisées pour les raisons suivantes :

- la disponibilité des équipes et des gestionnaires (durée des protocoles, contrainte emploi du temps) ;

- le temps de transport et les aléas climatiques (période des inventaires, contraintes météorologiques) ;
- des moyens financiers limités (étude financée par du mécénat et l'Agence de l'Eau).

Les compléments de substrat pour les analyses physiques ont pu introduire un biais si les substrats sont hétérogènes et différents aux prélèvements initiaux. La durée d'analyse n'a pas permis de prendre en compte l'intégralité des toitures (24 toitures sur 30) et de réaliser des analyses plus poussées sur les substrats en intégrant de nouveaux paramètres (éléments nutritifs, paramètres biologiques et physiques).

Les échantillons ont été conservés au frais dans la mesure du possible. Leur envoi par Chronopost ne garantit pas la chaîne du froid durablement. De plus nous n'avons pas de visibilité sur le traitement de nos échantillons à leur réception et lors des analyses.

e. Extension du Projet GROOVES à d'autres communes en France

Les résultats obtenus concernent actuellement les toitures en Île-de-France. Elargir ce type de projets à d'autres agglomérations urbaines comme Strasbourg, Lille ou Bordeaux permettrait de confronter les résultats actuels et d'en déduire si ce sont des particularités locales (région Île-de-France) ou généralisable à l'échelle du territoire Français.

4. Conclusion générale sur l'étude des substrats

L'hétérogénéité des toitures n'empêche pas de conclure sur de grandes tendances :

- augmenter l'épaisseur du substrat afin d'accueillir la flore et améliorer la rétention en eau ;
- employer les terres « agricoles » locales impactées par l'urbanisation ;
- intégrer à la conception une palette végétale d'herbacées diversifiée et résiliente à l'écosystème toiture (forte amplitude thermique, et en eau) comme par exemple des espèces méditerranéennes ou rudérales ;
- limiter la gestion et l'irrigation des toitures. Une toiture végétalisée doit être résiliente aux événements climatiques (canicule et sécheresse, engorgement en hiver) ;
- diversifier les habitats : mare, gravillons, sable, terre, bois mort, tas de pierre. (Fig. 32)



Figure 33 : Création de micro milieux avec des pierres afin de favoriser l'installation de biodiversité (toiture de GTMBA)

Bibliographie

- Adivet**, 2018. *Règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées*. APME ISBN 978-2-9535882-1-7
- Arias** et al, 2017. *Performances hydrologiques de trois toitures végétalisées différentes*, TSM n°12, p73 à 82
- Berthier E** et al., 2014. *FAVEUR : un outil d'aide à la conception des toitures végétalisées pour la gestion des eaux pluviales urbaines*, 8 pages
- Cuyper K et Dinne K**, 2006. *Toitures vertes : évacuation des eaux pluviales*, Les Dossiers du CSTC –3/2006 –Cahier n°2 – 8 pages
- Damas O**, 2013. *Recensement et caractérisation agronomique des substrats pour les toitures végétalisées extensives*, Fiche d'études expérimentale. Plante & Cité, 45 pages.
- Dusza Y** et al. 2017. *Multifunctionality is affected by interactions between green roof plant species, substrate depth and substrate type*, Ecology and Evolution, 13 pages
- Dusza Y**, 2017. *Toitures végétalisées et services écosystémiques : favoriser la multifonctionnalité via les interactions sols-plantes et la diversité végétale*. Ecologie, Environnement. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. Français. <NNT : 2017PA066033>. <tel-01587757>
- Fardeau J-C**, 2014, *Des indicateurs de la fertilité des sol*, Opinion scientifique, p 77- 100
- Fournier M et Boivin P** 2016. *Eudes des substrats et de l'hydrologie des toitures végétalisées du canton de Genève*, Rapport final du projet TVEG 2014 – 2016. Hepia, 29 pages.
- Getter K** et al, 2009, *Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs*, Environmental Science et technology n°43, 7 pages
- Gobat et al.**, 2010. *Le sol vivant, les bases de pédologie - biologies des sol*, 3è édition, 817 pages
- Johan H** 2017, *Étude sur la biodiversité des toitures végétalisées en Île-de-France - Suivi et écologie des communautés d'arthropodes dans le cadre de la première année d'expérimentation de l'étude GROOVES (Green ROOFS Verified Ecosystem Services)*, Rapport de BTS Bachelor.
- Lata J-C** et al 2017, *Role of substrate properties in the provision of multifunctional green roof ecosystem services*, Applied Soil Ecology, 13 pages <10.1016/j.apsoil.2017.09.012>. <hal-01685372>
- Lechevallier** et al. *Evaluer la dynamique biologique des sols, des analyses de la fertilité biologique, élément bénéfique aux plantes*, Phytoma, La défense des végétaux N°568 Février 2004, 3 pages
- Madre F.** 2014, *Biodiversité et bâtiments végétalisés : une approche multi-taxon en paysage urbain*, Museum National d'Histoire Naturelle, 173 pages
- Mairie de Paris**, 2011, *Plan biodiversité de Paris, Programme d'actions pour préserver et enrichir la biodiversité à Paris*, 80 pages
- Muratet A**, 2016. *Etat de Santé de la Biodiversité en Île-de-France, Apport du programme de science participative Vigie-Nature*, Dossier de Presse Mai 2016, 22 pages
- Ramier D** et al., 2013. *Analyse du fonctionnement hydrologique de toitures végétalisées : observation et modélisation*, 10 pages
- Schwager J** et al., 2013. *Identification des phénomènes prépondérants de transferts des métaux entre eaux de pluie et toitures végétalisées*, Novatech, 10 pages
- Tardy V**, 2014. *Lien entre la diversité microbienne, la stabilité des communautés microbiennes et le turnover des matières organiques du sol*. Sciences de la Terre. Université de Bourgogne. Français. <NNT : 2014DIJOS081>. <tel-01279426>
- Young T.** et al. 2014, *Importance of different components of green roof substrate on plant growth and physiological performance*, Thèse 223 page

Résumé

Le projet GROOVES (Green Roof Verified Ecosystem Services) étudie l'écosystème des toitures végétalisées dans sa globalité (flore, arthropodes, faune du sol, substrat, gestion). Cette étude, réalisée sur 32 toitures en Île-de-France, vise à mieux comprendre le fonctionnement écologique des toitures végétalisées et leur capacité à offrir des services (biodiversité, rétention en eau et stockage de carbone).

Une campagne d'échantillonnage des substrats a été réalisée (10 prélèvements par toiture). La variabilité de la richesse floristique et de la biomasse microbienne sont étudiées pour une dizaine d'indicateurs de sol. En parallèle, les services de rétention d'eau et de stock de carbone (au printemps 2018) sont évalués à l'échelle de la toiture.

La grande diversité des toitures végétalisées n'empêche pas d'observer de grandes tendances. La richesse floristique est influencée par l'épaisseur de substrat et la gestion alors que la biomasse microbienne réagit à la teneur en matière organique et au rapport C/N. La teneur en éléments grossiers, donc de la porosité en air, agit sur la rétention en eau.

Les toitures végétalisées répondent plus ou moins bien aux services étudiés. Nous préconisons des toitures avec des substrat épais, une diversité végétale conséquente et adaptée ainsi qu'une faible gestion. En 2019, l'étude de l'ADN environnemental, des mycorhizes, du ¹⁵N et d'évapotranspiration complétera cette analyse. L'intégration des toitures spontanées est fortement recommandée pour comprendre la dynamique d'installation de la flore sur les toits.

Mots clés : Toiture végétalisée, Substrat, Flore, Biodiversité, Rétention en eau, Stock de Carbone, expérience in situ.

Abstract

The Green Roof Verified Ecosystem Services project studies the ecosystem of green roofs (flora, arthropods, soil fauna, substrate, management). Its goal is the understanding of ecological functions and services provided by green roofs (biodiversity, water retention and carbon storage).

The substrate protocol has been realised (10 samples per roof). Floristic richness and microbial biomass variabilities are studied with ten soil indicators. The water retention and carbon stock services (spring 2018) are assessed on the roof scale.

Floristic richness is influenced by the substrate thickness and the plant management, whereas the microbial biomass is influenced by organic matter and "the C / N ratio". The water retention depends on the substrate nature (rough component and porosity in air).

Green roofs provide ecological services. We recommend roofs with thick substrates, plant diversity and a low management. The study of environmental DNA and mycorrhizae will complete this analysis.

Keys words : Green roof, Substrate, Flora, Biodiversity, Water retention, Carbon storage

Annexes

Annexe 1 : Présentation succincte des 30 toitures végétalisées © Adeline Decourcelle (3 pages)

Annexe 2 : Schéma des relations de la base de données sur les substrats des toitures végétalisées du projets GROOVES © Adeline Decourcelle (1 page)

Annexe 3 : Base de données : Page d'accueil et lien avec les formulaires © Adeline Decourcelle (1 page)

Annexe 1 : Présentation succincte des 30 toitures végétalisées

Pour chaque toiture sont présentées les informations suivantes :

- Description générale : une photo du contexte, son nom, le **type de toiture** selon l'ADIVET, la **surface** prospectée lors de l'étude GROOVES (en m²), l'**âge** de la toiture (en année), la **hauteur** au sol (en m), le **type de gestion** (jamais/ contrôle/ fauche ou tonte), le **type d'irrigation** (pluie ou arrosage) ;
- Substrat : la **profondeur** de substrat moyenne (en cm), la **nature du substrat** (terre agricole/ substrat mixte / substrat minéraux), la **réention maximale en eau** (L/m²), la **biomasse microbienne** (BM en mgC/kg), le **rapport C/N** (C/N), le taux de **Matière Organique** (MO en %) et le taux d'**éléments grossiers** (Refus en %) ;
- Flore : la **Richesse floristique** (Rf), la **Strate Végétale Dominante** (SVD) inspirée de F.Madre.

ALBAR	AMROU	ANTHEU	BOUCHA	BOUTOU
				
<p>Semi- Intensive (27 cm) S = 100 m², Age: 2 ans, H : 20 m Gestion : Jamais, Irrigation : Pluie Terre agricole, R.eau : 126,48 L/m² BM : 389 mgC/kg, Rf : 29 esp, SVD : Herbacées, C/N :10.83, MO : 6.3, Refus : 28.52</p>	<p>Extensive (5.6 cm) S = 468 m², Age: 58 ans, H = 5m Gest : Jamais, Irg : Pluie Substrat mixte, R.eau : 28.40 L/m² BM : 569 mgC/kg, Rf : 13 esp, SVD : Mixte, C/N : 11.68, MO : 6.3, Refus 24.65</p>	<p>Extensive (6.3 cm) S = 336 m², Age: 2 ans, H : 4 m Gest : Jamais, Irg : Pluie Substrat minéral, R.eau : 15.02 L/m² BM : 440 mgC/kg, Rf : 5 esp, SVD : Orpins, C/N : 8.9, MO : 7.6, Refus 21.65</p>	<p>Extensive (8.7 cm) S = 200 m², Age: 2 ans, 20 m Gest: Jamais, Irg : Pluie Substrat minéral, R.eau : 28.63L/m² BM : 341 mgC/kg, Rf : 24 esp, SVD : Orpins, C/N : 24.44, MO : 14.7, Refus 48.5.</p>	<p>Semi- Intensive (25.2 cm) S = 396 m², Age: 4 ans, 7 m Gest : Jamais, Irg : Pluie Substrat agricole, R.eau : 54.29 L/m² BM : 943 mgC/kg, Rf : 16 esp, SVD : Herbacées, C/N :8.95, MO : 7.1, Refus 36.23</p>
CARON	CHAVIN	CIMOD	CIROB	ECOBIO PRAIRIE
				
<p>Extensive (10.1 cm) S = 235 m², Age: 5 ans, H : 10 m Gest : Jamais, Irg : Pluie Substrat minéral, R.eau : 41.11L/m² BM : 313 mgC/kg, Rf : 31 esp, SVD : Herbacées, C/N :25.4, MO : 10.4, Refus : 46.09</p>	<p>Intensive (41.8 cm) S = 1050 m², Age: 10 ans, H : 11 m Gest : Fauche, Irg : Pluie Substrat mixte, R.eau : 218.16 L/m² BM : 948 mgC/kg, Rf : 29 esp, SVD : Herbacées, C/N :13.85, MO : 14.2, Refus : 18.12</p>	<p>Extensive (11 cm) S = 1640 m², Age: 10 ans, H : 12 m Gest : Tonte, Irg : Pluie Substrat mixte, R.eau : 52.36 L/m² BM : 210 mgC/kg, Rf : 19 esp, SVD : Mixte, C/N : 13.1, MO : 4.0, Refus : 58.89</p>	<p>Intensive (33.3 cm) S = 991 m², Age: 36 ans, H : 4.9 m Gest : Fauche, Irg : Arrosage Substrat mixte, R.eau : 142.45 L/m² BM : 358 mgC/kg, Rf : 33 esp, SVD : Herbacées, C/N :12.3, MO : 3.2, Refus : 3.04</p>	<p>Intensive (40 cm) S = 1300 m², Age: 4 ans, H : 12 m Gest : Fauche, Irg : Pluie Terre agricole, R.eau : 203.17 L/m² BM : NA mgC/kg, Rf : 14 esp, SVD : Herbacées, C/N :8.56, MO : NA, Refus : 4.21</p>

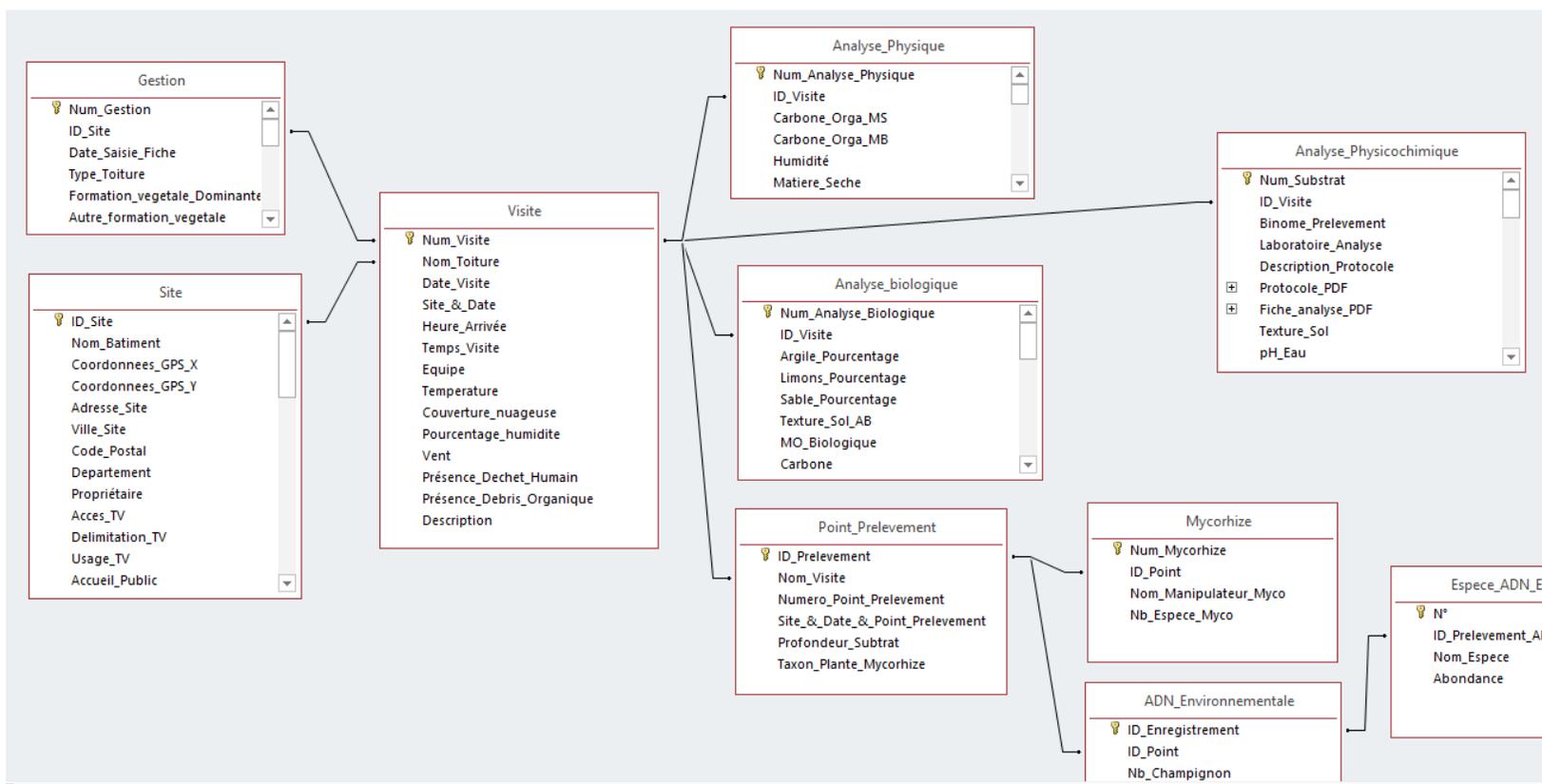
EIDER	FAUTEM	FONTA	FRANK	GOOPL
				
<p>Extensive (6.75 cm) S = 404 m², Age: 12 ans, H : 6 m Gest : Contôle, Irg : Pluie Substrat minéral, R.eau : 30.39L/m² BM : 347 mgC/kg, Rf : 10 esp, SVD : Orpins, C/N :17.09, MO : 11.3, Refus : 76.42</p>	<p>Intensive (33 cm) S = 407 m², Age: 2 ans, H : 3 m Gest : Fauche, Irg : Arrosage Terre agricole, R.eau : 178.13 L/m² BM : 547 mgC/kg, Rf : 30 esp, SVD : Herbacées, C/N :10.48, MO : 10.6, Refus : 2.92</p>	<p>Extensive (5.35 cm) S = 210 m², Age: 2 ans, H : 3 m Gest : Contrôle, Irg : Pluie Substrat minéral, R.eau : 16.61 L/m² BM : NA mgC/kg, Rf : 10 esp, SVD : Orpins, C/N :12.75, MO : NA, Refus : 37.89</p>	<p>Semi- Intensive (28.8 cm) S = 702 m², Age: 3 ans, H : 12 m Gest : Fauche, Irg : Pluie Terre agricole, R.eau : 129.98 L/m² BM : 210 mgC/kg, Rf : 7 esp, SVD : Herbacées, C/N :12.32, MO : 3.7, Refus : 1.93</p>	<p>Extensive (6.0 cm) S = 396 m², Age: 9 ans, H : 5 m Gest : Contrôle, Irg : Pluie Substrat mixte, R.eau : 26.28 L/m² BM : 1344 mgC/kg, Rf : 22 esp, SVD : Mixte, C/N :6.72, MO : 9.8, Refus : 21.14</p>
GRENEL	GTMBA	LUAUB	MECHO	MOZIN
				
<p>Intensive (40 cm) S = 1180 m², Age: 5 ans, H : 30 m Gest : Fauche, Irg : Arrosage Terre agricole, R.eau : 204.67 L/m² BM : 471 mgC/kg, Rf : 12 esp, SVD : Herbacée, C/N :13.13, MO : 6.0, Refus : 2.24</p>	<p>Semi- Intensive (12.6cm) S = 590 m², Age: 3 ans, H : 8 m Gest : Contrôle, Irg : Arrosage Substrat mineral, R.eau : 52.41 L/m² BM : 292 mgC/kg, Rf : 36 esp, SVD : Herbacée, C/N : 15.2, MO : 2.3, Refus : 53.86</p>	<p>Extensive (5.75 cm) S = 360 m², Age: 10 ans, H : 7 m Gest : Jamais, Irg : Pluie Substrat mineral, R.eau : 11.49 L/m² BM : NA mgC/kg, Rf : 6 esp, SVD : Orpins, C/N :15.23, MO : NA, Refus : 19.47</p>	<p>Extensive (8.6 cm) S = 1080 m², Age: 5 ans, H : 15 m Gest : Contrôle, Irg : Pluie Substrat mixte, R.eau : 27.29 L/m² BM : 572 mgC/kg, Rf : 18 esp, SVD : Mixte, C/N :13.82, MO : 5.4, Refus : 35.46</p>	<p>Intensive (56 cm) S = 560 m², Age: 43 ans, H : 21 m Gest : Jamais, Irg : Arrosage Terre agricole, R.eau : 263.48 L/m² BM : 1344 mgC/kg, Rf : 22 esp, SVD : Mixte, C/N :8.79, MO : 4.8, Refus : 5.05</p>

OLSER	PAREX	PERIS	PROMA	PULMA
				
<p>Semi- Intensive (28.65 cm) S = 91 m², Age: 4 ans, H : 5 m Gest : Fauche, Irg : Arrosage Terre agricole, R.eau : 137.42 L/m² BM : 377 mgC/kg, Rf :18 esp, SVD : Herbacée, C/N :16.56, MO : 5.6, Refus : 22.61</p>	<p>Extensive (5.0 cm) S = 2980 m², Age: 8 ans, H : 12 m Gest : Contrôle, Irg : Pluie Substrat minéral, R.eau :NA BM : 898 mgC/kg, Rf : 13 esp, SVD : Orpins, C/N :10.1, MO : 15.4, Refus : 60.09</p>	<p>Extensive (5.9 cm) S = 1270 m², Age: 2 ans, H : 8 m Gest : Controle, Irg : Pluie Substrat mixte, R.eau : 24.77 L/m² BM : NA mgC/kg, Rf : 11 esp, SVD : Orpins, C/N :27.11, MO : NA, Refus : 42.71</p>	<p>Extensive (5.5 cm) S = 237 m², Age: 5 ans, H : 6 m Gest : Jamais, Irg : Pluie Substrat mineral, R.eau : NA BM : 448 mgC/kg, Rf : 21 esp, SVD : Orpins, C/N :13.97, MO : 7.3, Refus : 30.65</p>	<p>Semi- Intensive (24.4 cm) S = 315 m², Age: 4 ans, H : 4 m Gest : Jamais, Irg : Pluie Terre agricole, R.eau : 124.39 L/m² BM : 303 mgC/kg, Rf : 27 esp, SVD : Herbacée, C/N :11.96, MO : 4.3, Refus : 3.39</p>
ROROL	RUWAT	SEINE	SIBUET	WWF
				
<p>Extensive (9.2 cm) S = 986 m², Age: 7 ans, H : 10 m Gest : Contôle, Irg : Pluie Substrat mixte, R.eau : 30.53 L/m² BM : NA mgC/kg, Rf : 16 esp, SVD : Orpins, C/N :0.08, MO : NA, Refus : 34.25</p>	<p>Extensive (6.5 cm) S = 780 m², Age: 58 ans, H : 17.75 m Gest : Jamais, Irg : Pluie Substrat minéral, R.eau : 29.70 L/m² BM : 610 mgC/kg, Rf : 12 esp, SVD : Mixte, C/N : 8.17, MO : 10.3, Refus : 30.59</p>	<p>Intensive (40 cm) S = 2000 m², Age: 0 ans, H : 20 m Gest : Jamais, Irg : Arrosage Terre agricole, R.eau : 184.67 L/m² BM : NA mgC/kg, Rf : 45 esp, SVD : Herbacée, C/N :9.48, MO : NA, Refus : 28.09</p>	<p>Extensive (7.65 cm) S = 320 m², Age: 11 ans, H : 16 m Gest : Contrôle, Irg : Pluie Substrat minéral, R.eau : 19.84L/m² BM : 531 mgC/kg, Rf : 27 esp, SVD : Herbacée, C/N :16.45, MO : 6.7, Refus : 34.13</p>	<p>Extensive (9.3 cm) S = 532 m², Age: 10 ans, H : 4 m Gest : Contrôle, Irg : Pluie Substrat mixte, R.eau : 42.28 L/m² BM : 1340 mgC/kg, Rf : 15 esp, SVD : Mixte, C/N : 5.49, MO : 15.1, Refus : 14.54</p>

Annexe 2 : Schéma des relations de la base de données sur les substrats des toitures végétalisées du projets

GROOVES © Adeline Decourcelle

Lien de type un à plusieurs. Avec au centre la table centrale « Visite » autour gravite la table Gestion, Site, Analyses Physiques, Analyses Chimique, Analyses Biologique et point de prélèvement



Annexe 3 : Base de données : Page d'accueil et lien avec les formulaires © Adeline Decourcelle

Base avec saisie simplifié grâce à son interface d'accueil renvoyant sur les différents formulaires de saisie

Localisation Toiture Végétalisée

Localisation et situation

Nom toiture: ANTHEU
 Propriétaire: Paris Habitat
 Nom Batiment: Créche - Paris Habitat
 Adresse: 8 rue André Theuriet
 Ville: Paris
 Code Postal: 75015
 Département: 75

Contexte paysager

Presence Pente: % Pente: 0
 Description Pente: Toiture plate
 Exposition TV: Ombre_portee_partielle et mi_ombre
 Element TV: Module technique
 Description Contexte Paysage: Toiture enclavé entre les batiment de grande hauteur et une cour paysagère. Proximité de la toiture d'ALBAR

Accessibilité et Usage

Accès TV: Echelle fixe, assez haute
 Delimitation TV: Parapet
 Usage TV: Aucun

Analyse Physique

Localisation et situation

Num_Analyse_Physique: ID_Visite: GRENEL - 20/06/2018

Potentiel Biologique

Carbone_Orga_MS	3,83	% MS
Matiere_Seche	87	% MB
Matiere_Orga_MS	7,66	% MS
Reserve_utilisable_pf_1,7	91,46	ml/L
Reserve_utilisable_pf_2,0	135,87	ml/L
Retention_eau_sec_pf_4,2	13,76	

Capacité maximale en eau

Masse_volumique_CME	1701,34	g/L
Masse_volumique_CME_105	1189,66	g/L
Porosite_air_CME	1,499	% vol
Porosite_totale_CME	52,668	% vol
Retention_max_CME	51,168	% vol
Tassement_CME_cm	2,717	cm
Tassement_CME_pourcentage	27,167	%

Potentiel capillaire pF

Masse_Vol_App_Seche_pf_1,0	1165,82	g/L
Porosite_pf_1,0	53,42	% MB
Retention_eau_sec_pf_1,0	40,39	% MS
Capacite_retention_eau_pf_1,0	470,87	ml/L
Capacite_retention_air_pf_1,0	63,37	ml/L
Masse_Vol_App_Seche_pf_1,7	1165,82	g/L
Porosite_pf_1,7	53,42	% MB
Retention_eau_sec_pf_1,7	32,54	% MS
Capacite_retention_eau_pf_1,7	379,4	ml/L
Capacite_retention_air_pf_1,7	154,84	ml/L
Masse_Vol_App_Seche_pf_2,0	1165,82	g/L
Porosite_pf_2,0	53,42	% MB
Retention_eau_sec_pf_2,0	28,73	% MS
Capacite_retention_eau_pf_2,0	335	ml/L
Capacite_retention_air_pf_2,0	199,24	ml/L

Biodiversité sur les toitures Végétalisées

Informations générales

- Localisation
- Phase conception
- Gestion toiture

Saisie données

- Visite terrain
- Point de prélèvement
- Mychorize
- ADN Environnemental
- Analyses physiques
- Analyses chimique
- Analyses biologique

Gestion Toiture Végétalisée

Informations générales

Num Gestion: Nom toiture: CIMOD
 Date Saisie Fiche: 03/04/2018
 Type Toiture: Extensif

Végétaux et substrat

Formation vegetale Dominante: Mixte
 Autre formation vegetale: Mousse ; patch graminée ; Iris parsemées
 Nombre strate: 3

Gestion Toiture

Existence gestion:
 Entreprise prestataire: ID Verté
 Type intervention: Oui, des tontes ou des fauches sont réalisés
 Frequence Intervention: 6 à 10 fois par an
 Coût annual Gestion: 0,00 €
 Description: Goutte à goutte enterré non utilisée (pb étanchéité) Pas de mesures envers la biodiversité
 Info gestion à confirmer auprès de :
 Systeme Irrigation: Utilisation Irrigation:
 Type Irrigation: Pluie

Analyses Biologiques du Substrat

Biomasse microbienne

Biomasse_micr	1340
Biomasse_micr	1,5
Indice_activite	0,52
Azote_BM	573
Phosphore_BM	443
Potassium_BM	374
Calcium_BM	53
Magnesium_BM	53

Carbone

Carbone	87,6
Sable_Pourcent	69,8
Texture_Sol_Ai	SI
Carbone_miner	2346
Carbone_indice	2,7
Cm_BM	62,5

Matière Organique

MO_Biologique	15,1
MO_liee	3
MO_libre	12,1
MO_liee_Pourc	20
MO_libre_Pourc	80

Azote

Azote	10,16
Azote_MO_liee	4,86
Azote_MO_libre	5,3
Azote_minerale	122,5
Azote_indice_r	1,2