



ÉCOLOGIE DES TOITURES VÉGÉTALISÉES

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE GROOVES
GREEN ROOFS VERIFIED ECOSYSTEM SERVICES
2017 - 2019

L'INSTITUT
PARIS
REGION

ARB
AGENCE RÉGIONALE
DE LA BIODIVERSITÉ

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION
Fouad Awada

**DIRECTION DE L'AGENCE RÉGIONALE
DE LA BIODIVERSITÉ ÎDF**
Julie Collombat-Dubois

DIRECTION DE LA COMMUNICATION
Sophie Roquelle

AUTEURS
Marc Barra et Hemminki Johan, Écologues,
Agence régionale de la biodiversité
en Île-de-France, Institut Paris Region

DIRECTION ARTISTIQUE
Olivier Cransac

**CONCEPTION ET
RÉALISATION GRAPHIQUE**
Studio TROISQUATRE
(www.troisquatre.fr)

Référence bibliographique à utiliser :
M. Barra, H. Johan (coord.), Écologie des toitures végétalisées.
Synthèse de l'étude GROOVES (Green roofs verified ecosystem
services). 2021, 92p.

Photo de couverture : Audrey Muratet | ARB idF

Parution : mai 2021

ISBN 978-2-7371-2041-1

© L'Institut Paris Region
Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés. Les copies,
reproductions, citations intégrales ou partielles, pour utilisation autre que strictement
privée et individuelle, sont illicites sans autorisation formelle de l'auteur ou de l'éditeur.
La contrefaçon sera sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal
(loi du 11-3-1957, art. 40 et 41). Dépôt légal : 2^e trimestre 2021.

FABRICATION
Sylvie Coulomb

RELATIONS PRESSE
Sandrine Kocki,
sandrine.kocki@institutparisregion.fr

IMPRESSION
ARLYS

Institut Paris Region
15, rue Falguière
75740 Paris Cedex 15
01 77 49 77 49



www.arb-idf.fr



SOMMAIRE

#1	5	#5	37
LES TOITURES VÉGÉTALISÉES CAUTION VERTE OU RÉELLE CONTRIBUTION À LA NATURE EN VILLE ?		LES SOLS ET SUBSTRATS DES TOITURES VÉGÉTALISÉES	
#2	11	#6	55
PRÉSENTATION DES TOITURES DE L'ÉTUDE GROOVES		CAPACITÉ DE RÉTENTION EN EAU DES TOITURES VÉGÉTALISÉES	
#3	19	#7	61
LA FLORE DES TOITURES VÉGÉTALISÉES		EFFET DE RAFRAÎCHISSEMENT PAR LES TOITURES VÉGÉTALISÉES	
#4	29	#8	71
LES INVERTÉBRÉS DES TOITURES VÉGÉTALISÉES		FAIRE ÉVOLUER LA CONCEPTION ET LA GESTION	
			80
		L'ESSENTIEL	

D'APRÈS UNE CONTRIBUTION COLLECTIVE DE :

Marc BARRA¹, Pierre BARRÉ², Yves BERTHEAU³,
Rudy BUENO⁶, Lucien CLAIVAZ¹, Isabelle DAJOZ⁶,
Adeline DECOURCELLE¹, Louis DEHARVENG³,
Samuel DEQUIEDT⁴, Lucile DEWULF¹, Yann DUSZA⁶,
Sébastien FILOCHE³, Jonathan FLANDIN¹, Colin FONTAINE³,
Amandine GALLOIS¹, Emmanuel GENDREAU,
Guillaume HAMON¹, Céline HOUSSIN³, Hemminki JOHAN¹,
Jean-Christophe LATA⁶, Gilles LECUIR¹, Grégoire LOÏS³,
Pierre-Alain MARON⁴, Aurore MOLLEREAU³,
Audrey MURATET^{1&7}, Laurent PALKA³, Émilie PERIÉ¹,
David RAMIER⁵, Lionel RANJARD⁴, Xavier RAYNAUD⁶,
Ophélie RICCI¹, Christelle SCAGLIOLA¹, Luka THOMAS¹,
Rémi VAL⁵, Maxime ZUCCA¹

1. Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France,
L'Institut Paris Région
2. Laboratoire de géologie de l'École Normale Supérieure
3. Muséum national d'Histoire naturelle
4. Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation
et l'environnement (INRAE – UMR Agroécologie Dijon)
5. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement,
la mobilité et l'aménagement (Cerema) – Equipe de recherche TEAM
6. Institut d'Écologie et des Sciences de l'environnement de Paris (IEES-Paris)
7. Laboratoire image ville environnement (LIVE) UMR 7362 UNISTRA-CNRS |
Université de Strasbourg

L'ARB îdF s'est entourée de partenaires scientifiques et techniques, dont l'Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris (iEES Paris), le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN), l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae – UMR Agroécologie Dijon), le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) Île-de-France, l'Office pour les insectes et leur environnement (Opie), l'Observatoire départemental de la biodiversité urbaine (Odbu) de la Seine-Saint-Denis, l'Association des toitures & façades végétales (Adivet), et de propriétaires et gestionnaires de toitures végétalisées qui ont participé au programme, tout particulièrement Paris Habitat.

L'ARB îdF a bénéficié du soutien de partenaires contributeurs ou mécènes, dont la Métropole du Grand Paris, la Région Île-de-France, l'Agence de l'eau Seine Normandie, la Fondation Placoplatre, le Syndicat national du béton prêt-à-l'emploi (SNBPE), l'Adivet et les Entreprises du paysage (Unep).

AVANT-PROPOS

Cette étude s'inscrit dans la continuité de travaux de recherche précédents qui montraient déjà l'intérêt des toitures végétalisées à accueillir la biodiversité (Madre, 2014) et leur capacité à fournir des services écosystémiques (Dusza, 2016).

YANN DUSZA, IEES-PARIS



Les toitures végétalisées sont des écosystèmes urbains et construits en essor constant en France et dans le monde. Elles sont associées à plusieurs services écosystémiques tels que la limitation du ruissellement des eaux de pluie vers les canalisations, la réduction des effets

d'îlots de chaleur urbains ou l'augmentation de la biodiversité en ville. L'amélioration de la quantité et de la qualité des services écosystémiques attendus nécessite de comprendre l'influence des interactions entre les composantes de la toiture végétalisée, à savoir la composition du sol, sa profondeur et la communauté végétale, sur les multiples fonctions écosystémiques associées. Pourtant, ces interactions n'ont jamais été étudiées dans le contexte des toitures végétalisées. A l'aide d'expérimentations en milieu contrôlé puis en conditions réelles sur une toiture parisienne, nous avons cherché à comprendre comment les interactions entre les composantes des toitures végétalisées influencent des fonctions majeures liées aux cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et de l'eau, ainsi qu'à la pollinisation. Nous avons mis en évidence une influence majeure des interactions entre type de sol, profondeur du sol, espèces de plantes et diversité végétale sur (1) le niveau de réalisation des fonctions écosystémiques ainsi que (2) sur les interactions entre ces fonctions. Nous avons montré que le choix des composantes d'une toiture pouvait conduire à des compromis entre services écosystémiques. Nous proposons des pistes de conception et de gestion pour obtenir des toitures végétalisées multifonctionnelles.

Yann Dusza. Toitures végétalisées et services écosystémiques : favoriser la multifonctionnalité via les interactions sols-plantes et la diversité végétale, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2017 / sous la direction de Luc Abbadie, iEES Paris

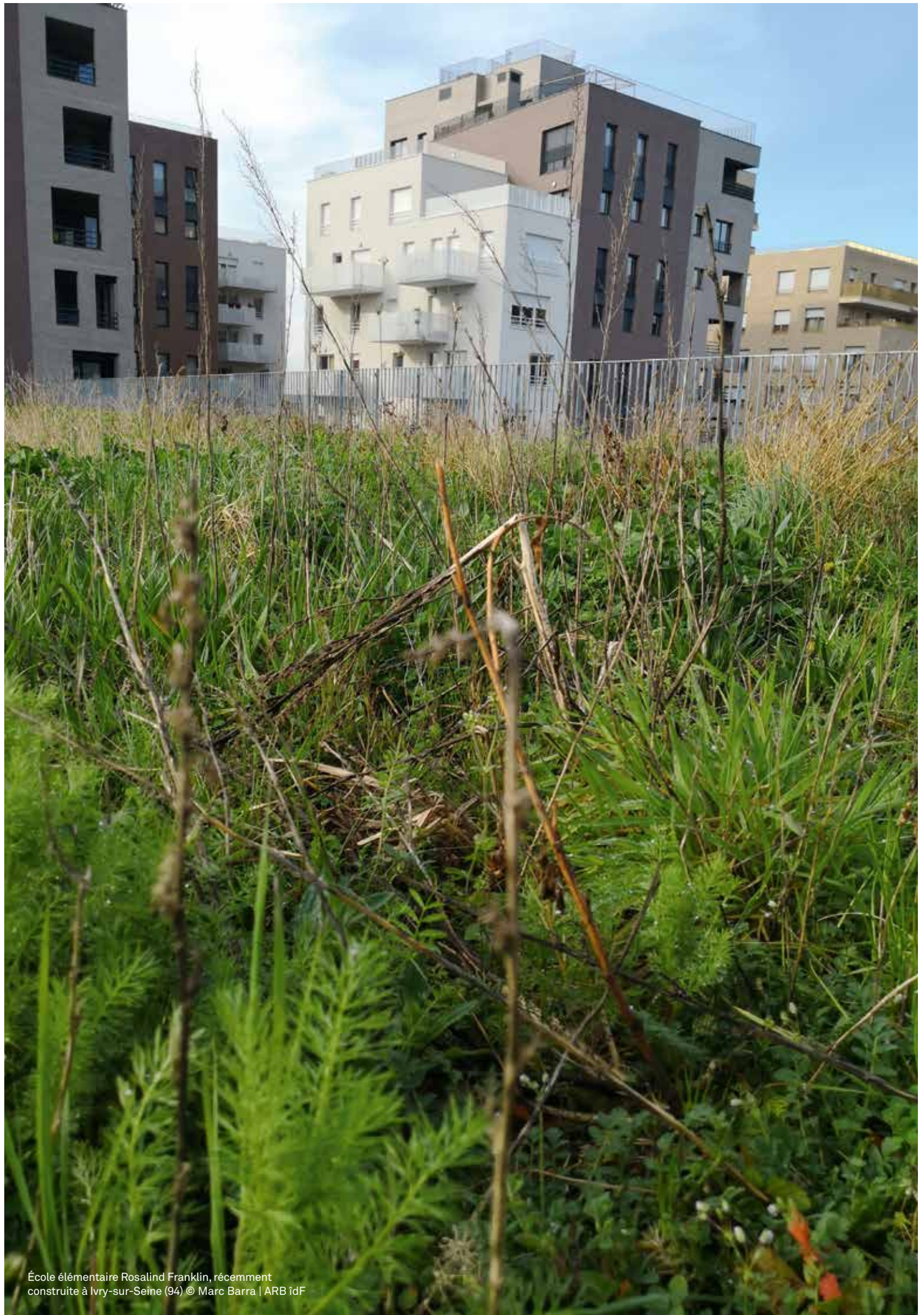
FRÉDÉRIC MADRE, MNHN



L'urbanisation détruit, fragmente les écosystèmes et participe aux changements globaux et à l'érosion de la biodiversité. Cette matrice urbaine hostile est principalement constituée de voiries et de bâti. Depuis peu, les bâtiments se couvrent de systèmes de végétalisation (introduction

de végétaux sur des supports adaptés). Ces systèmes apportent des bénéfices pour l'homme et permettent de réduire l'hostilité de la matrice en rendant la ville plus perméable aux espèces sauvages. Il existe différents types de végétalisation qui ne sont pas équivalents du point de vue de la biodiversité. Dans cette thèse, nous avons analysé les communautés utilisant ces différents habitats potentiels : (1) les plantes sauvages des toits, (2) les arthropodes et les oiseaux des toits, (3) les arthropodes des façades et (4) les arthropodes des bâtiments végétalisés au sein du paysage urbain. Nous avons mis en évidence l'importance de la complexité structurelle de la végétation sur les communautés étudiées.

Frédéric Madre. Biodiversité et bâtiments végétalisés : une approche multi-taxons en paysage urbain, MNHN, 2014 / sous la direction de Philippe Clergeau et Nathalie Machon, MNHN



École élémentaire Rosalind Franklin, récemment construite à Ivry-sur-Seine (94) © Marc Barra | ARB idF

#1

LES TOITURES VÉGÉTALISÉES CAUTION VERTE OU RÉELLE CONTRIBUTION À LA NATURE EN VILLE ?

METTRE UN TERME À L'ARTIFICIALISATION DES SOLS : UNE PRIORITÉ

Plus des trois quarts des européens vivent désormais en ville. En France, l'artificialisation des sols n'a cessé de progresser ces dernières décennies, sur un rythme compris entre 16 000 et 60 000 hectares de terres par an sur la période récente [1]. Le phénomène d'artificialisation constitue l'un des facteurs du déclin de la biodiversité. Il participe aussi à l'aggravation du changement climatique. Pour y faire face, l'État comme les collectivités territoriales réfléchissent aux moyens de réduire la pression des villes sur les espaces naturels, agricoles et forestiers, notamment à travers l'objectif Zéro Artificialisation Nette (ZAN) [2].



Inventaire des insectes pollinisateurs à l'aide du protocole SPIPOLL
© Ophélie Ricci | ARB idF

Au-delà de l'extension urbaine, la minéralité des villes est également problématique pour le vivant et contribue à amplifier les impacts liés au changement climatique (ruissellement, inondation, îlot de chaleur urbain...) tout autant qu'à dégrader la santé et le bien-être des habitants par la carence en espaces verts. Si les solutions pour répondre à ces défis sont multiples, la reconquête de la nature en ville, en quantité comme en qualité, apparaît aujourd'hui comme une réponse

transversale et renvoie à l'équation complexe entre densification des villes et besoin de nature.

En Île-de-France, et en particulier dans le territoire du Grand Paris, le déclin de la biodiversité en milieu urbain s'est accéléré depuis les années 2000 et touche l'ensemble des cortèges espèces [3]. De nombreux secteurs présentent un déficit important d'espaces de nature, à l'instar de la petite couronne francilienne qui fait partie des métropoles les plus fortement carencées par rapport à d'autres villes européennes [4]. Y augmenter la part de nature doit être considéré comme une priorité de l'action politique locale, et ce à toutes les échelles.

Or, il s'agit de ne plus limiter la présence de la nature à un rôle purement décoratif mais de l'intégrer pleinement au projet urbain [5]. Tous les espaces de nature en pleine terre sont précieux, qu'il s'agisse des friches et forêts urbaines, des milieux humides, des prairies urbaines, des coulées et promenades vertes, des espaces vivriers. Gérés de façon écologique et connectés entre eux, ils participent à la reconquête de la biodiversité comme à l'atténuation du changement climatique (séquestration et stockage du carbone dans les sols et les arbres) et à l'adaptation vis-à-vis de celui-ci (gestion du ruissellement, régulation des inondations, atténuation des îlots de chaleur, amélioration de la qualité de l'air).

Les espaces végétalisés sur le bâti ou sur dalle prennent également part à la nature en ville, bien que leurs fonctionnalités écologiques ne remplacent pas celles d'espaces à caractère naturel en pleine terre [6]. Dans ce contexte, le développement des toitures végétalisées s'est accéléré depuis les années 2000, accompagnant cet engouement pour la nature en ville. Ces dernières intéressent les aménageurs et les architectes, comme un moyen de perméabiliser davantage la matrice urbaine au vivant et pour pouvoir accueillir de nouveaux espaces de nature dans des secteurs très minéralisés. Par ailleurs, dans un contexte de recrudescence des îlots de chaleur urbains et de gestion du ruissellement, la végétalisation du bâti apparaît comme une des solutions pour adapter les secteurs urbains denses aux conséquences du changement climatique. A Berlin, l'introduction du CBS, ou coefficient de biotope par surface, a permis



Toiture végétalisée réalisée par Topager sur le siège de GTM Bâtiment à Nanterre © Audrey Muratet | ARB idF

d'imposer aux aménageurs de végétaliser davantage leurs projets dans les arrondissements très minéralisés. Depuis, d'autres villes comme Paris l'ont reproduit dans leurs Plans Locaux d'Urbanisme (PLU). Une étude de l'APUR (Agence Parisienne de l'Urbanisme) réalisée en 2013, montre que la surface totale des toitures végétalisées à Paris s'élève à 44 hectares. Selon les auteurs, il existe un potentiel total de 460 hectares de toitures plates végétalisables, dont 80 hectares pourraient le devenir rapidement (les 380 restants demandant des adaptations plus conséquentes) [7]. Pour autant, la végétalisation du bâti n'est pas une fin en soi et ne doit pas servir de caution à l'urbanisation galopante. Elle a largement été utilisée pour verdir les opérations d'aménagement, voire comme étiquette pour l'acceptabilité des projets. L'effet de mode entourant la végétalisation du bâti ne doit pas nous faire perdre de vue l'objectif principal, à savoir de maintenir la pleine terre dans les villes, et de s'inscrire dans une politique cohérente d'écologie urbaine à toutes les échelles (trames vertes, bleues et brunes, protection des espaces de nature existants, gestion écologique, désartificialisation des sols, etc.).

Pour les écologues, les toitures végétalisées n'en restent pas moins intéressantes en tant qu'objet d'étude scientifique. Relativement petites, disponibles en grand nombre et présentant plusieurs variantes, elles se prêtent idéalement à la réalisation d'une étude scientifique de terrain à grande échelle.

LES TOITURES VÉGÉTALISÉES EN FRANCE ET DANS LE MONDE

Les toitures végétalisées ont une longue histoire et leur existence remonte à plusieurs milliers d'années, notamment dans les pays nordiques. Selon les professionnels du secteur, « dans les années 20, la généralisation du béton armé dans les constructions et l'apparition de toitures plates a fait naître l'idée des terrasses-jardins. Dans les années 1970-80, les préoccupations croissantes que soulevaient la dégradation de la qualité du milieu et la raréfaction rapide des espaces verts dans les villes ont ravivé l'intérêt à l'égard des toitures végétalisées en tant que solution écologique en Europe du Nord » [8]. D'après le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), c'est en Allemagne que le marché des toitures végétalisées a connu une forte expansion dans les années 1980, où près de 40% des villes proposent encore actuellement des incitations financières pour leur développement. La Suisse fait également partie des pays exemplaires en la matière. La ville de Bâle subventionne la végétalisation tandis qu'à Zurich et dans le canton de Genève, les maîtres d'ouvrage ont l'obligation de végétaliser toute nouvelle terrasse plate. Actuellement, plus de 75 municipalités européennes proposent des mesures incitatives ou des règlements pour l'installation de toitures végétalisées.

En France, selon le CSTB, 300 000 m² de toitures végétalisées ont été installés en 2006. 90 % des installations sont réalisées dans le neuf et le secteur public est à l'origine de 75 % des toitures végétalisées. Les incitations sont encore toutefois peu nombreuses en France, si ce n'est à travers les agences de l'eau qui les considèrent comme des ouvrages de gestion des eaux pluviales si elles respectent certaines conditions de profondeur. Certaines collectivités incitent également la végétalisation des toitures à travers leur PLU (Plan Local d'Urbanisme) (Paris, Strasbourg, Montreuil).

DES PRATIQUES EN ÉVOLUTION : LES APPORTS DE L'ÉCOLOGIE URBAINE

La végétalisation du bâti est un marché principalement tenu par les professionnels de l'étanchéité dont les pratiques ont progressivement évolué. L'engouement croissant pour la végétalisation a accéléré l'industrialisation de toute une filière, que ce soit pour les solutions d'étanchéité et de drainage, les membranes de protection et géotextiles, les substrats de culture, ou encore les plantes et leurs besoins en gestion (arrosage, fertilisation, etc.). En France et en Europe, la majorité des toitures végétalisées sont dites « exten-

sives », c'est-à-dire dont la profondeur de substrat n'excède pas 15 cm (généralement entre 5 et 8 cm) et dont la production est le plus souvent standardisée (caissettes ou tapis précultivés).

Ces dernières ont été largement plébiscitées en raison de leur légèreté, leur facilité d'installation, leur faible coût et le peu d'entretien requis. L'interprofession distingue trois catégories de toitures végétalisées : extensives, semi-extensives et intensives. Ces systèmes sont déterminés par l'épaisseur du substrat à laquelle sont associés un type de gestion, d'irrigation et de strate végétale. D'autres typologies ont été depuis proposées notamment sur la base de la strate végétale dominante [9].

Cette surreprésentation des toitures végétalisées extensives « prêtes à l'emploi » a fait l'objet de critiques de la part des paysagistes et des écologues. Ils voyaient dans cette uniformisation un manque de cohérence avec le contexte local, une érosion des savoirs-faire pourtant très diversifiés en la matière ainsi qu'une faible mobilisation des savoirs en écologie (botanique, écologie urbaine, écologie des sols) nécessaires dans le cadre de toute politiques de nature en ville. Ce constat ne s'applique pas qu'aux toitures et vise l'ensemble des espaces verts urbains : malgré un intérêt croissant pour les questions



Inventaires en cours sur la toiture d'une résidence de Paris Habitat © Gilles Lecuir | ARB idF

relatives à la biodiversité et l'émergence d'un paysage écologique, la vision horticole et la maîtrise du vivant prévalent encore aujourd'hui [10] dans les démarches de nature en ville. L'approche est encore largement dominée par les professions du paysage et de l'horticulture, bien que la place des écologues et des naturalistes se renforce progressivement.

Dans sa thèse en 2014, Frédéric Madre, MNHN (Muséum national d'Histoire naturelle), avait montré qu'il existait différents types de végétalisation qui n'étaient pas équivalents du point de vue de la biodiversité [11]. A travers l'analyse des communautés d'espèces utilisant ces différents habitats potentiels, les plantes, les arthropodes et les oiseaux, il a mis en évidence l'importance de la complexité structurelle de la végétation sur les communautés étudiées.

En 2017, Yann Dusza, IEES-Paris, s'est intéressé aux services écosystémiques associés aux toitures végétalisées [12]. A l'aide d'expérimentations en milieu contrôlé puis en conditions réelles sur une toiture parisienne, il a cherché à comprendre les paramètres de conception qui influencent des fonctions majeures (cycle du carbone, de l'azote et de l'eau, ainsi que celui de la pollinisation). Ces travaux ont montré que le type de sol, sa profondeur, les espèces de plantes et leur diversité agissent sur ces fonctions écosystémiques. Yann Dusza propose des pistes de conception

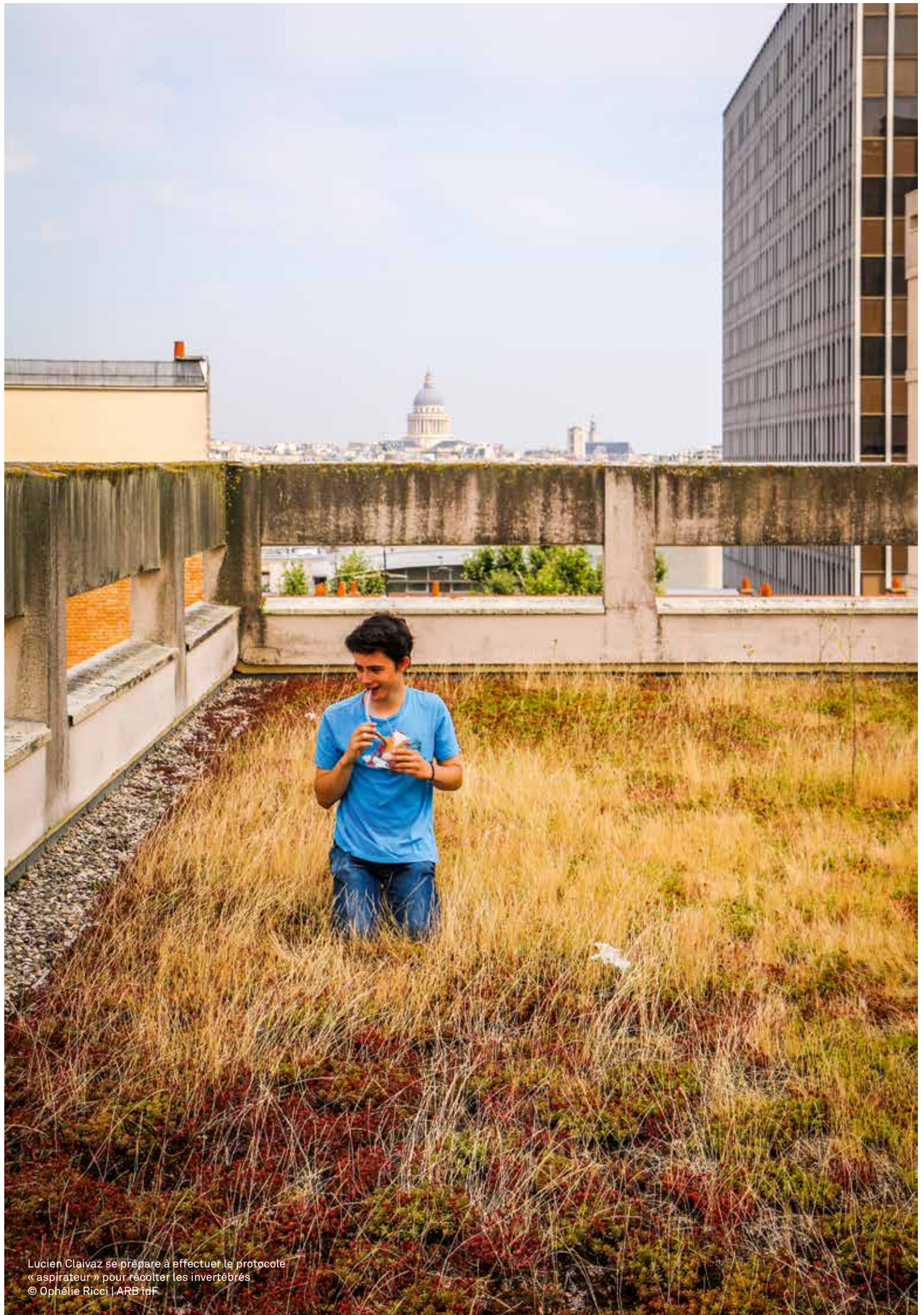
et de gestion pour obtenir des toitures végétalisées multifonctionnelles tout en rappelant qu'il est inenvisageable d'attendre que ces dernières délivrent tous les services écosystémiques en même temps.

Ces travaux en écologie urbaine ont permis de nuancer les arguments régulièrement avancés dans les brochures commerciales sur les services rendus par les toitures végétalisées en matière d'accueil de biodiversité, de capture du CO₂, de rétention des eaux pluviales. Ils ont en particulier permis de les objectiver par rapport à des paramètres de conception.

L'étude GROOVES s'inscrit dans la continuité de ces travaux. L'ARB îdF et ses partenaires ont mené une campagne d'inventaires taxonomiques et de mesures de certains services écosystémiques (rétention d'eau, rafraîchissement, pollinisation) sur un échantillon de 36 toitures végétalisées en zone urbaine dense d'Île de France. Plusieurs questions ont motivé cette étude : quelle biodiversité trouve-t-on sur les toitures végétalisées ? Quelles fonctions écologiques y sont associées ? Quelles différences existent entre les toitures et les systèmes de végétalisation ? Les toitures sont-elles comparables aux autres espaces de nature urbains ? Comment mieux conseiller la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre sur la conception et la gestion optimale de ces objets pour la biodiversité ?

La « Voile » solaire confondue avec la végétalisation
de la Seine Musicale à Boulogne-Billancourt
© Marc Barra | ARB idF





Lucien Claivaz se prépare à effectuer le protocole « aspirateur » pour récolter les invertébrés
© Ophélie Ricci | ARB idF

#2

PRÉSENTATION DES TOITURES DE L'ÉTUDE GROOVES

Les 36 toitures végétalisées de l'étude GROOVES sont distribuées au cœur du Grand Paris. La sélection s'appuie sur la volonté d'une répartition entre différents types de végétalisation habituellement identifiés par les professionnels de l'étanchéité, à savoir 18 toitures « extensives » (hauteur de substrat inférieure à

15 cm, plantées), 6 toitures « semi-intensives » (hauteur de substrat entre 15 et 30 cm, plantées), 8 toitures « intensives » (hauteur de substrat supérieure à 30 cm, plantées) et enfin 4 toitures dites « wildroof » (substrat seul de profondeur variable, sans plantations).

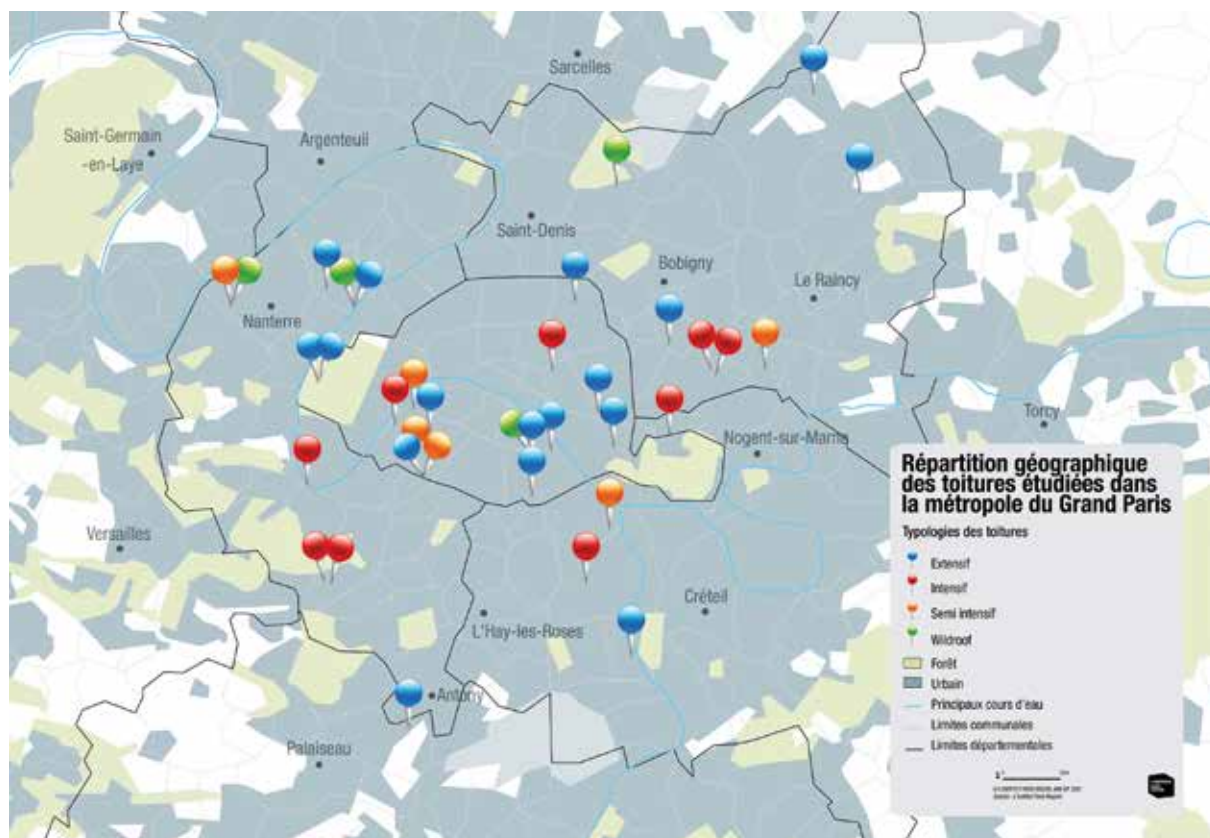


FIGURE 1 Répartition géographique des toitures étudiées dans la métropole du Grand Paris. © ARB idF | Institut Paris Region

Bien que les études comparatives nécessitent une certaine homogénéité de l'échantillon, une des particularités de cette étude réside dans la grande diversité des toitures et des bâtiments qui les accueillent. Plus des trois quarts des toitures étudiées sont récentes et ont entre 3 et 15 ans d'existence. Les toitures âgées de plus de 30 ans sont plus rares (5 toitures). C'est le bâtiment logistique dit « Mozinor », à Montreuil, qui accueille la toiture végétalisée la plus ancienne, conçue en 1975. A l'inverse, la toute nouvelle Seine Musicale, inaugurée en 2017 à Boulogne-Billancourt, abrite la plus récente des toitures végétalisées que nous avons étudiées.

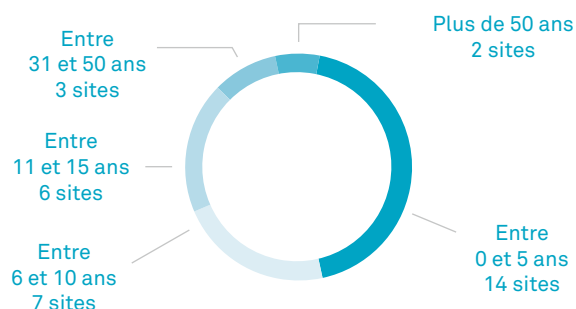


FIGURE 2 Répartition des classes d'âge des toitures sélectionnées pour l'étude. © ARB idF | Institut Paris Region

Les bâtiments de notre sélection présentent des caractéristiques hétérogènes, notamment en ce qui concerne leur hauteur. La toiture végétalisée du Centre commercial Beaugrenelle à Paris culmine à 30 mètres tandis que celle du Centre technique du Conseil départemental de Seine-Saint-Denis ne se trouve qu'à 2,71 mètres du sol. Les toitures végétalisées étudiées ont des surfaces également variables. La plupart d'entre elles se situent entre 200 et 600 m². La toiture du groupe scolaire Olivier de Serres, dans le 15^e arrondissement de Paris, ne mesure que 91 m², en comparaison de l'immense Hall 7 du Parc des expositions de Villepinte qui abrite une toiture d'une surface de près de 3 000 m² (partie étudiée) mais 11 000 m² en réalité, certainement l'une des plus vaste d'Île-de-France !

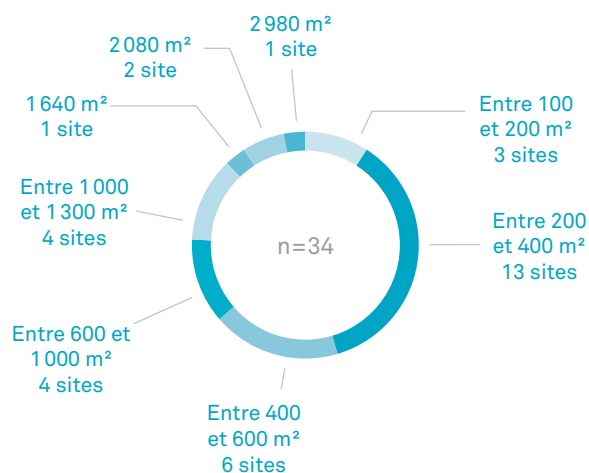


FIGURE 3 Répartition des surfaces des toitures sélectionnées.
© ARB îdF – Institut Paris Region

La profondeur du substrat est un paramètre important dans nos analyses. Si la moyenne de l'échantillon se situe environ à 20 cm d'épaisseur, la toiture la plus profonde est celle de la partie boisée de l'école des sciences et de la biodiversité à Boulogne-Billancourt, avec 1 m de profondeur. De son côté, la toiture « wildroof » du bâtiment technique du Conseil départemental de Seine-Saint-Denis (93) ne fait que 5 cm d'épaisseur.

La typologie utilisée dans le cadre de l'étude GROOVES s'appuie sur la définition retenue par les concepteurs de toitures végétalisées :

- A.** 18 toitures dites « extensives » - hauteur de substrat inférieure à 15 cm, plantées
- B.** 6 toitures dites « semi-intensives » - hauteur de substrat entre 15 et 30 cm, plantées
- C.** 8 toitures dites « intensives » - hauteur de substrat supérieure à 30 cm, plantées
- D.** 4 toitures dites « wildroof » - substrat seul de profondeur variable, sans plantations



A. Végétalisation dite « extensive »
Parc des Expositions, Paris Villepinte



B. Végétalisation dite « Semi-intensive »
Ecole Olivier de Serres, Paris



C. Végétalisation dite « Intensive »
Bâtiment « Mozinor », Montreuil



D. Végétalisation spontanée dite « wildroof »
Muséum national d'Histoire naturelle, Paris

FIGURE 4 Typologie des toitures végétalisées utilisée dans le cadre de l'étude GROOVES, établie sur la base de la définition retenue par les concepteurs de toitures végétalisées
© ARB îdF | Institut Paris Region

LES 36 TOITURES VÉGÉTALISÉES EN UN CLIN D'ŒIL



ALBAR
RÉSIDENCE PARIS HABITAT

TYPE Semi-Intensive
SURFACE 100 m²
AGE 2 ans
HAUTEUR 20 m
SUBSTRAT Terre agricole (27 cm)



AMROU
AMIRAL ROUSSIN

TYPE Extensive
SURFACE 468 m²
AGE 58 ans
HAUTEUR 5 m
SUBSTRAT Mixte (5,6 cm)



ANTHEU
CRÈCHE ANDRÉ THEURIET

TYPE Extensive
SURFACE 336 m²
AGE 2 ans
HAUTEUR 4 m
SUBSTRAT Minéral (6,3 cm)



BOUCHA
BOULEVARD DE CHARONNE

TYPE Extensive
SURFACE 200 m²
AGE 2 ans
HAUTEUR 20 m
SUBSTRAT Minéral (8,7 cm)



BOUTOU
ÉCOLE DES BOUTOURS

TYPE Semi-Intensive
SURFACE 396 m²
AGE 4 ans
HAUTEUR 7 m
SUBSTRAT Terre agricole (25,2 cm)



CARON
CENTRE DE LOISIR DU VAL CARON

TYPE Extensive
SURFACE 235 m²
AGE 5 ans
HAUTEUR 10 m
SUBSTRAT Minéral (10,1 cm)



CD93
BÂTIMENT TECHNIQUE

TYPE Wildroof
SURFACE 355 m²
AGE 48 ans
HAUTEUR 2,71 m
SUBSTRAT Mixte (3,5 cm)



CHAVIN
CHÂTEAU DE VINCENNES

TYPE Intensive
SURFACE 1 050 m²
AGE 10 ans
HAUTEUR 11 m
SUBSTRAT Mixte (41,8 cm)



CIMOD
CITÉ DE LA MODE

TYPE Extensive
SURFACE 1 640 m²
AGE 10 ans
HAUTEUR 12 m
SUBSTRAT Mixte (11 cm)



CIROB
CINÉMA ROBESPIERRE

TYPE Intensive
SURFACE 991 m²
AGE 36 ans
HAUTEUR 4,9 m
SUBSTRAT Mixte (33,3 cm)



ECOBIO FORET
ECOLE DE LA BIODIVERSITÉ

TYPE Intensive
SURFACE 2 080 m²
AGE 4 ans
HAUTEUR 12 m
SUBSTRAT Terre agricole (100 cm)



ECOBIO PRAIRIE
ECOLE DE LA BIODIVERSITÉ

TYPE Intensive
SURFACE 1 300 m²
AGE 4 ans
HAUTEUR 12 m
SUBSTRAT Terre agricole (40 cm)



EIDER
ECOLE EIDERS

TYPE Extensive
SURFACE 404 m²
AGE 12 ans
HAUTEUR 6 m
SUBSTRAT Minéral (6,75 cm)



FAUTEM
FAUBOURG DU TEMPLE

TYPE Intensive
SURFACE 407 m²
AGE 2 ans
HAUTEUR 3 m
SUBSTRAT Terre agricole (33 cm)



FONTA
ECOLE FONTANES

TYPE Extensive
SURFACE 210 m²
AGE 2 ans
HAUTEUR 3 m
SUBSTRAT Minéral (5,35 cm)



FONTA WILD
ÉCOLE FONTANES

TYPE Wildroof
SURFACE NA
AGE NA
HAUTEUR 3 m
SUBSTRAT Minéral (5,35cm)



FRANK
ÉCOLE ROSALIND FRANKLIN

TYPE Semi-Intensive
SURFACE 702 m²
AGE 3 ans
HAUTEUR 12 m
SUBSTRAT Terre agricole (28,8cm)



GOOPL
FONDATION GOOD PLANET

TYPE Extensive
SURFACE 396 m²
AGE 9 ans
HAUTEUR 5 m
SUBSTRAT Mixte (6 cm)



GRENEL
CENTRE BEAUGRENELLE

TYPE Intensive
SURFACE 1 180 m²
AGE 5 ans
HAUTEUR 30 m
SUBSTRAT Terre agricole (40cm)



GTMBA
GTM BÂTIMENT

TYPE Semi-Intensive
SURFACE 590 m²
AGE 3 ans
HAUTEUR 8 m
SUBSTRAT Minéral (12,6cm)



GTMBA WILD
GTM BÂTIMENT

TYPE Wildroof
SURFACE NA
AGE 3 ans
HAUTEUR 10 m
SUBSTRAT Minéral (12,6cm)



LUAUB
ÉCOLE LUCIE AUBRAC

TYPE Extensive
SURFACE 360 m²
AGE 10 ans
HAUTEUR 7 m
SUBSTRAT Minéral (5,75cm)



MECHO
MÉDIATHÈQUE DE CHOISY LE ROI

TYPE Extensive
SURFACE 1 080 m²
AGE 5 ans
HAUTEUR 15 m
SUBSTRAT Mixte (8,6cm)



MOZIN (GÉRÉE ET NON GÉRÉE)
BÂTIMENT MOZINOR

TYPE Intensive
SURFACE 560 m²
AGE 43 ans
HAUTEUR 21 m
SUBSTRAT Terre agricole (56cm)



MUENT
BÂT. D'ENTOMOLOGIE DU MNHN

TYPE Wildroof
SURFACE 374 m²
AGE 2 ans
HAUTEUR 16
SUBSTRAT Minéral (10 cm)



OLSER
ECOLE OLIVIER DE SERRE

TYPE Semi-Intensive
SURFACE 91 m²
AGE 4 ans
HAUTEUR 5 m
SUBSTRAT Terre agricole (28,6 cm)



PAREX
PARC DES EXPOS. DE VILLEPINTE

TYPE Extensive
SURFACE 2 980 m²
AGE 8 ans
HAUTEUR 12 m
SUBSTRAT Minéral (5 cm)



PERIS
BÂTIMENT PÉRISCOPE

TYPE Extensive
SURFACE 1 270 m²
AGE 2 ans
HAUTEUR 8 m
SUBSTRAT Mixte (5,9 cm)



PROMA
PROTECTION MATERNELLE

TYPE Extensive
SURFACE 237 m²
AGE 5 ans
HAUTEUR 6 m
SUBSTRAT Minéral (5,5 cm)



PULMA
HÔTEL PULLMAN

TYPE Semi-Intensive
SURFACE 315 m²
AGE 4 ans
HAUTEUR 4 m
SUBSTRAT Terre agricole (24,4 cm)



ROROL
MÉDIATHÈQUE ROMAIN ROLLAND

TYPE Extensive
SURFACE 986 m²
AGE 7 ans
HAUTEUR 10 m
SUBSTRAT Mixte (9,2 cm)



RUWAT
RUE WATTEAU

TYPE Extensive
SURFACE 780 m²
AGE 58 ans
HAUTEUR 17,75 m
SUBSTRAT Minéral (6,5 cm)



SEINE
SEINE MUSICALE

TYPE Intensive
SURFACE 2 000 m²
AGE Neuve
HAUTEUR 20 m
SUBSTRAT Terre agricole (40 cm)



SIBUE
RUE SIBUET

TYPE Extensive
SURFACE 320 m²
AGE 11 ans
HAUTEUR 16 m
SUBSTRAT Minéral (7,7 cm)



WWF
FONDATION WWF

TYPE Extensive
SURFACE 532 m²
AGE 10 ans
HAUTEUR 4 m
SUBSTRAT Mixte (9,3 cm)

Ci-dessous : la punaise des céréales (*Aelia acuminata*), une habitué des toitures hébergeant des graminées.
© Ophélie Ricci | ARB idF





La Crépide capillaire (*Crepis capillaris*) contraste avec les Sédums de la toiture du Parc des expositions de Paris Villepinte
© Audrey Muratet | ARB idF

#3

LA FLORE DES TOITURES VÉGÉTALISÉES

Au-delà d'une infrastructure verte générant des services écosystémiques, les toitures végétalisées sont des lieux de vie à part entière pour les espèces, des habitats naturels. Utiliser ce regard d'écologue permet de cerner les particularités qui font des toitures végétalisées un milieu original. Températures élevées, vent fort, sol réduit et fortes sécheresses sont autant de conditions environnementales extrêmes limitant la capacité du vivant à s'y installer. Opposées à ces limites, les faibles pressions humaines régissant ces milieux peuvent quant à elles permettre l'installation d'espèces habituellement sensibles à la fréquentation ou aux apports extérieurs.

C'est à partir de ces constats qu'une étude approfondie de la flore des toitures a été menée. Quelle flore trouve-t-on sur les toitures végétalisées ? Est-elle similaire à ce que l'on observe au sol ? La typologie proposée par les concepteurs a-t-elle une résonance écologique ? Quels sont les effets des caractéristiques des toitures et de leur environnement sur la flore ? Autant de questions auxquelles le regard d'écologue essaye de répondre pour mieux comprendre le rôle des toitures pour la flore.

INVENTAIRE DE LA FLORE

PROTOCOLE



Évaluer le rôle des toitures végétalisées passe nécessairement par une connaissance approfondie des cortèges floristiques. La flore joue un rôle essentiel dans l'établissement des autres cortèges d'espèces, comme les invertébrés. Au-delà de la biodiversité stricte, la flore est également liée à plusieurs services écosystémiques tels que la rétention en eau ou encore la réduction de l'îlot de chaleur urbain.

La composition et la diversité des plantes vasculaires spontanées et plantées ont été étudiées, pour chacune des toitures, à travers des relevés dans 10 carrés d'1 m², une fois par an pendant 3 ans, selon le protocole Vigie-Flore. Un relevé exhaustif de la flore a également été réalisé sur toute la surface des toitures. L'utilisation d'un protocole issu de sciences participatives nous permet également de comparer la richesse floristique des toitures avec d'autres milieux comme les friches urbaines ou les prairies. Enfin, la distinction entre espèces plantées et spontanées, ainsi que l'étude des traits écologiques associés, nous apporte des informations sur les conditions abiotiques des toitures et nous permet d'orienter les conceptions vers des choix de végétalisation plus appropriés.

En plus du protocole Vigie-Flore, un inventaire exhaustif de la flore a également été réalisé sur chaque toiture afin de détecter l'ensemble des espèces présentes et de mieux appréhender quels cortèges sont susceptibles de coloniser les toitures végétalisées.

Les inventaires floristiques ont été pilotés par Audrey Muratet, Maître de conférences à l'Université de Strasbourg.

Bryophytes (mousses) et lichens

Les bryophytes et les lichens sont deux taxons particulièrement sensibles aux conditions du milieu et à leurs modifications (ensoleillement, hygrométrie, pollution). En complément de la flore vasculaire, un inventaire exhaustif des bryophytes et des lichens a été réalisé sur 20 toitures de l'échantillon en visant l'observation d'un maximum de micro-milieux (sol, gravier, mur, etc...). Les inventaires des bryophytes et lichens ont été pilotés par Sébastien Filoche, Directeur scientifique adjoint du Conservatoire Botanique national du Bassin parisien



Réalisation du protocole Vigie-Flore avec matérialisation des carrés d'1 m² par des piquets © Lucile Dewulf | ARB îdF

Au total, en considérant les relevés exhaustifs, plus de 400 espèces de plantes ont été observées sur les 36 toitures étudiées, ce qui donne une première idée de la richesse rencontrée sur les toits. En ce qui concerne les relevés Vigie-Flore, 292 espèces ont été observées sur l'ensemble des carrés entre 2017 et 2019, dont 70% étaient des espèces spontanées (véhiculées par le vent, la faune). Parmi les espèces les plus fréquentes (spontanées et plantées), observées dans plus de 200 quadrats, on note *Sedum album*, *Sedum hispanicum*, *Sedum kamtschaticum*, *Vulpia myuros*. Certaines espèces menacées ont été relevées parmi

les spontanées, comme *Galium parisiense*, *Crepis foetida*, *Laphangium luteoalbum*, *Misopates orontium*. A noter que des espèces rares ont également été observées comme *Ornithopus compressus* ou *Ornithopus pinnatus*. Ces observations confirment le rôle joué par les toitures végétalisées dans l'accueil d'une biodiversité variée, parfois rare, en ville. Au-delà des espèces plantées ou pré-cultivées initialement sur les toitures, la distinction entre plantes spontanées et plantées nous apporte une information complémentaire pour comprendre l'écologie des toitures et leur capacité d'accueil pour la biodiversité urbaine.



Plantes les plus représentées dans les inventaires Vigie-Flore © Audrey Muratet | ARB idF

VERS UNE NOUVELLE TYPOLOGIE DES TOITURES VÉGÉTALISÉES ?

La typologie des toitures végétalisées couramment admise dans la profession est principalement basée sur la profondeur de substrat. Cette répartition n'a pas forcément de sens en écologie mais s'avérerait un moyen de classement utile. D'autres typologies ont été proposées, notamment sur la base de la strate végétale dominante [9].

Bien que cette classification ait été utilisée dans le cadre de nos analyses, nous en montrons aussi les limites. L'analyse des paramètres physico-chimiques du

substrat, comme le pourcentage de matière organique, l'azote disponible ou encore le pourcentage d'argile renvoient à une organisation plus objective des différents modes de conception. La figure ci-dessous propose une nouvelle typologie basée sur ces caractéristiques.

Dans cette nouvelle classification, 4 types de toitures sont distinguées :

- Les toitures intensives avec des substrats épais, une gestion et une irrigation forte, de bonnes capacités de rétention en eau, une granulométrie ainsi qu'un pourcentage de sable faible et un pourcentage d'argile élevé.

- Les toitures extensives avec un substrat fin, sableux à forte granulométrie, avec une faible capacité de rétention d'eau; la gestion et l'irrigation y sont absentes ou légères. Il existe ensuite au sein des extensives trois typologies de toitures qui suivent un gradient d'activité du sol illustré par la capacité d'échange cationique, le taux d'azote, la biomasse microbienne et le rapport C/N :
 - Les toitures extensives peu fertiles
 - Les toitures extensives moyennement fertiles
 - Les toitures extensives très fertiles

On remarque que la typologie extensive ne suffisait pas à décrire tous les types de toitures qu'elle englobait. Par ailleurs, la typologie semi-intensive ne se retrouve pas dans les catégories obtenues, elle est répartie dans les nouvelles catégories : intensives, extensives moyennement fertiles et extensives peu fertiles. Les « wildroofs » se retrouvent dans les nouvelles catégories extensives moyennement fertiles et extensives peu fertiles. Pour valider ces nouvelles typologies, il est nécessaire de les confronter aux réalités écologiques retrouvées sur les toitures. Pour cela, la flore, à travers les trois indicateurs que sont la richesse en espèces, la richesse phylogénétique et fonctionnelle a été comparée en fonction des typologies (voir Figure 6). Ces indicateurs nous montrent notamment des différences au sein de l'ancienne catégorie extensive, qui regroupe dans la

même typologie des toitures pourtant très différentes du point de vue de leur fonctionnement écologique. Cependant, bien qu'étant justifiée sur le plan écologique, cette nouvelle typologie ne s'avère pas nécessairement plus commode pour les concepteurs de toitures végétalisées. En effet, cette classification nécessite d'avoir une connaissance approfondie des caractéristiques de la toiture, notamment grâce à l'analyse physico-chimique du substrat.



La ciboulette (*Allium schorodoprasum*), Parc des expositions de Paris Villepinte © Audrey Muratet | ARB idF

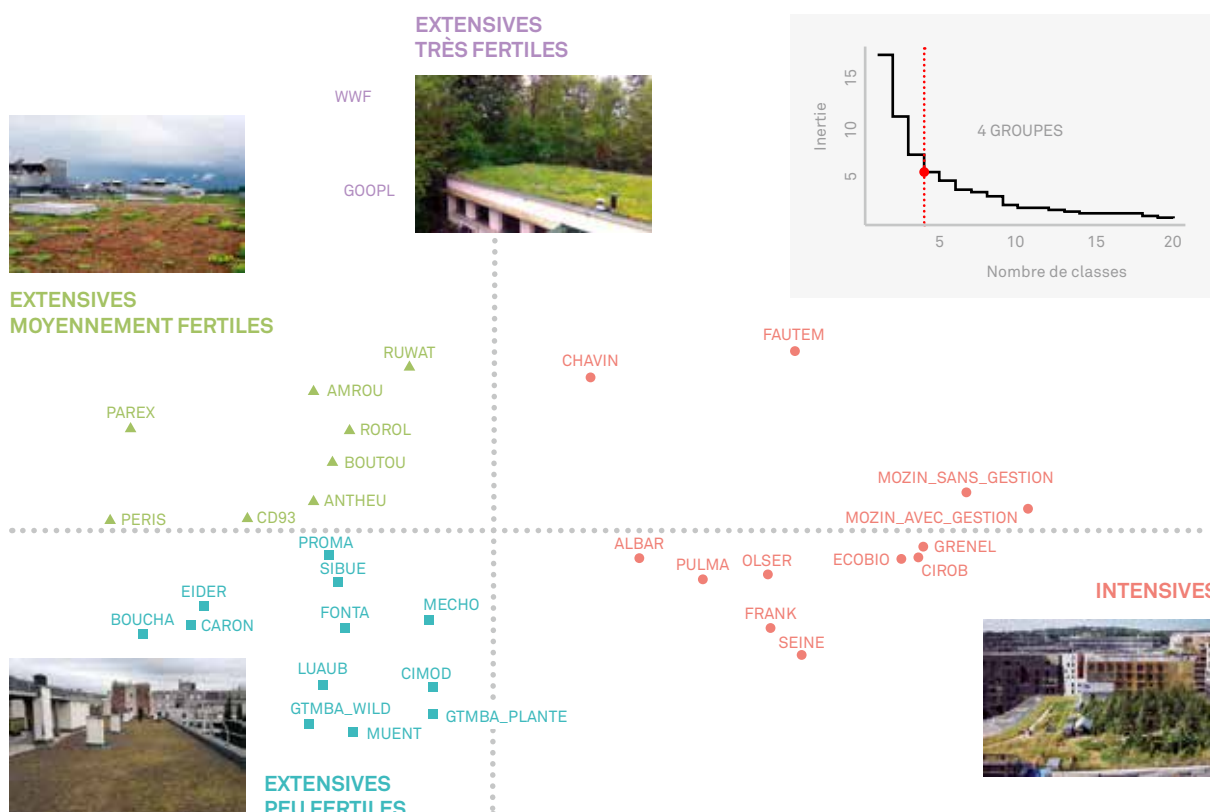


FIGURE 5 Classification ascendante hiérarchique des typologies de toitures végétalisées. © Audrey Muratet | ARB idF

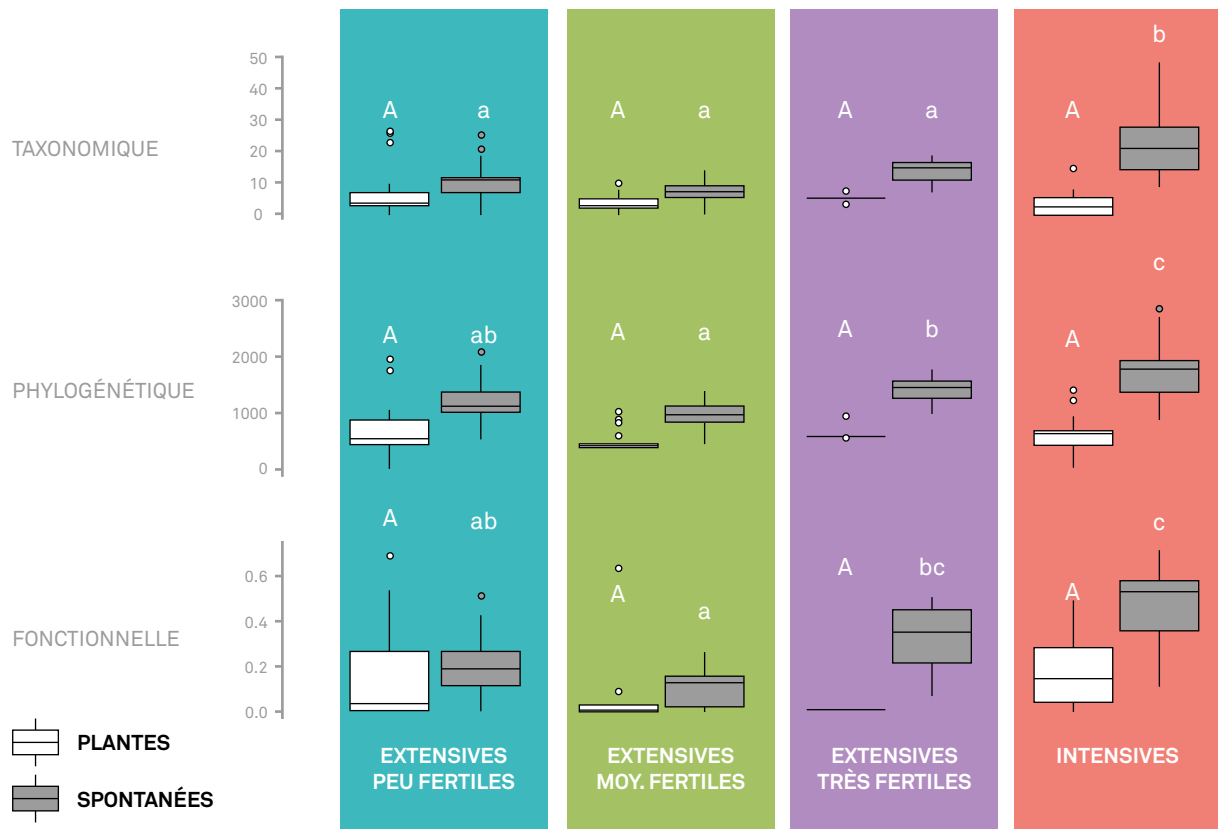
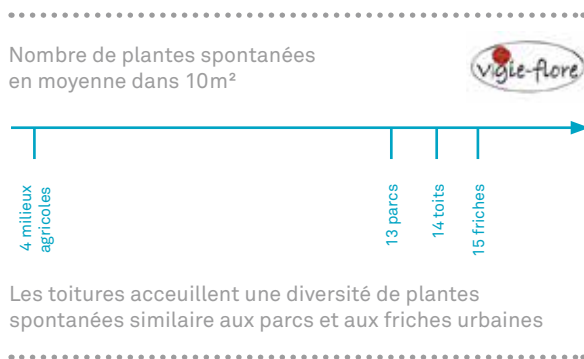


FIGURE 6 Comparaison de la richesse taxonomique, phylogénétique et fonctionnelle des 4 nouvelles typologies proposées.
 © Audrey Muratet | ARB idF

En comparant les relevés sur les toits de ceux effectués dans les autres espaces verts au sol, il s'avère que les toitures abritent en moyenne une diversité en plantes similaire à celle rencontrée dans les friches et les parcs urbains [13].



Les toitures accueillent une diversité de plantes spontanées similaire aux parcs et aux friches urbaines

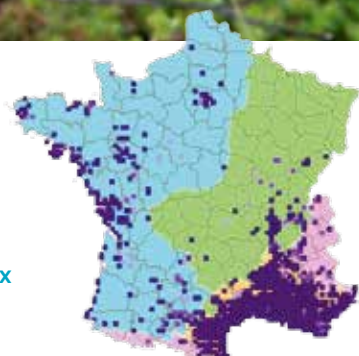
FIGURE 7 Richesse en plante spontanées en fonction des milieux dans le cadre du protocole Vigie-Flore. © Audrey Muratet | ARB idF

Mais cette diversité est très variable. Les toitures extensives, avec un substrat essentiellement minéral et/ou avec une faible épaisseur abritent une richesse floristique moins élevée que les toitures intensives ou semi-intensives. Bien que plus pauvres, les toitures extensives et les toitures témoins dites «wildroofs» (sans plantations ou semis) n'en demeurent pas moins intéressantes du point de vue de la biodiversité. Elles présentent une composition particulière ne ressemblant à rien d'autre en ville. On y observe des assemblages originaux, comme des espèces plantées et spontanées de pelouses sèches sableuses, d'origine locale ou plus lointaine, méditerranéennes, continentales, nord-américaines...



Anisantha madritensis
© Audrey Muratet
| ARB îdF

Champs et
lieux sablonneux

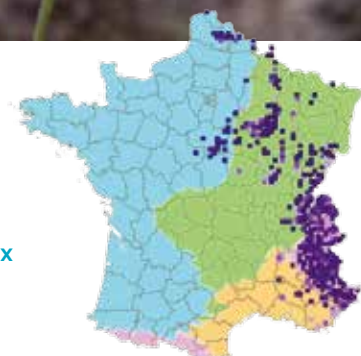


Source : FCBN 2016



Pilosella piloselloides
© Audrey Muratet
| ARB îdF

Prés, côteaux



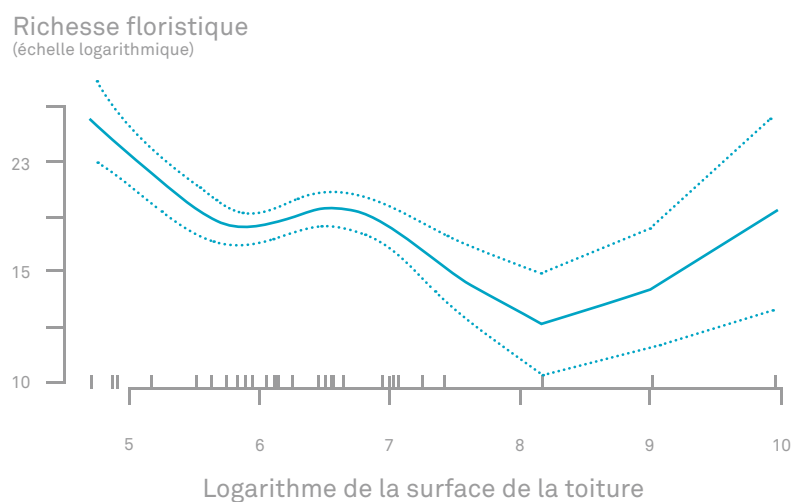
Source : FCBN 2016

FIGURE 8 Le Brome de Madrid (*Anisantha madritensis*) et l'Épervière fausse piloselle (*Pilosella piloselloides*), deux espèces voyageuses retrouvées sur les toitures. © Audrey Muratet | ARB îdF

C'est un premier enseignement de l'étude : la biodiversité ne se mesure pas qu'à la diversité/richeesse en espèces. La composition et l'assemblage comptent tout autant. Ainsi, l'intérêt des toitures au regard de la flore est à moduler en fonction du critère considéré (richeesse, indice de rareté, composition). Cela renvoie à l'importance de diversifier les modes de conception et les types de toitures végétalisées au sein des villes. Les résultats obtenus montrent par ailleurs que certains paramètres de conception font varier la richesse floristique, comme la qualité du substrat et sa profondeur, ainsi que la hauteur du bâtiment.

Un des résultats inattendus de cette étude a été la mise en évidence d'une relation négative entre la surface de la toiture et la richesse en plantes spontanées. Ceci pourrait résulter du fait que les conditions sur les toits de grande surface pourraient être plus extrêmes en termes de chaleur et de sécheresse car ils seraient moins protégés par les éléments bâtis ou naturels environnants et plus soumis au vent. Cette hypothèse pourrait être évaluée en comparant les compositions floristiques et faunistiques des toitures grandes et petites pour rechercher l'existence ou non de communautés de milieux plus extrêmes dans le premier cas.

FIGURE 9 Relation entre la surface de la toiture et la richesse floristique spontanée © Audrey Muratet | ARB îdF



La hauteur du bâtiment est corrélée à la richesse en plantes spontanées, en syrphes et en abeilles sauvages. L'effet est positif jusqu'à environ 10 mètres de hauteur (environ 3 étages). Ensuite, la richesse en flore n'augmente plus mais celle des pollinisateurs diminue. Ces observations indiqueraient un effet de la hauteur, mais restent néanmoins à confirmer par des analyses plus poussées.

La profondeur du substrat est le facteur expliquant le mieux la richesse floristique, mais aussi la richesse totale en pollinisateurs, dont les coléoptères et les abeilles sauvages. On remarque que la richesse floristique n'augmente plus au-delà de 25 cm d'épaisseur alors que la diversité en pollinisateurs continue elle d'augmenter au-delà de ce seuil. La composition du substrat joue également un rôle important dans l'installation d'une flore diversifiée. Les analyses montrent que les teneurs en argile et en sable permettent un maximum de richesse floristique autour de 10 et 60% respectivement.

Les effets paysagers ont également été évalués. Ceux-ci englobent principalement les modalités d'occupation du sol entourant la toiture (bâti, espaces verts, etc.). Cependant, les résultats obtenus ne nous permettent pas d'observer une influence de l'environnement sur la flore de la toiture. Les choix de conception joueraient donc un rôle prépondérant dans l'installation d'une flore diversifiée sur les toitures.

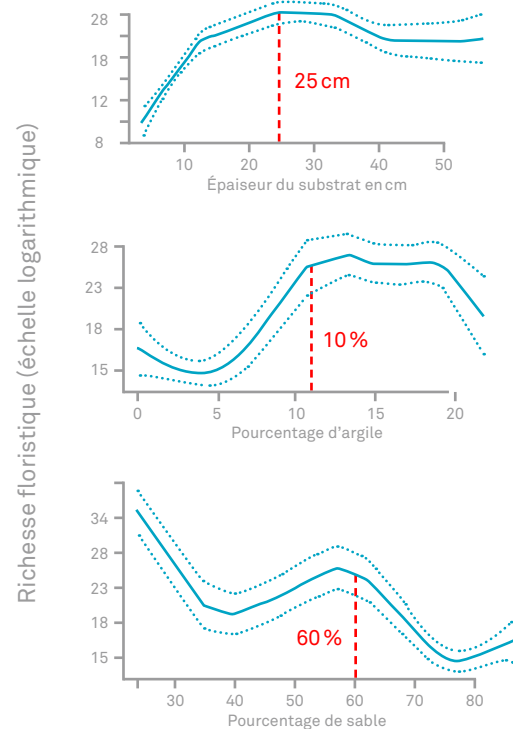


FIGURE 10 La profondeur du substrat tout comme les teneurs en argile et en sable ont une influence sur la richesse floristique © Audrey Muratet | ARB idF

LES MOUSSES DES TOITURES

Par Sébastien Filoche, Conservatoire botanique national du Bassin parisien

Les bryophytes (mousses, sphaignes, hépatiques) sont des végétaux "anciens", assez discrets et méconnus, faisant la transition évolutive entre les algues et les végétaux vasculaires ou supérieurs, tels que les plantes à fleurs. Il existe environ 25 000 espèces de bryophytes dans le monde, 1 800 en Europe et 1 300 à 1 400 en France. Leur détermination précise est assez délicate et nécessite souvent loupe, microscope et ouvrages spécialisés complexes. Leur observation révèle des formes et des caractères surprenants et surtout plus variés que ce que l'on pense généralement.

Dans le cadre de l'étude GROOVES, 20 toitures ont été inventoriées par le Conservatoire Botanique national du Bassin parisien (CBNBP). Au total, 40 taxons ont été observés sur l'ensemble des toitures. 8 espèces sont présentes sur une grande majorité des toitures : *Bryum argenteum*, *Ceratodon purpureus*, *Funaria hygrometrica*, *Ptychostomum capillare*, *Barbula convoluta* et *Syntrichia ruralis*. Sur les zones un peu plus humides ou « anciennes »

(sans piétinement), *Amblystegium serpens* et *Brachythecium rutabulum* sont aussi bien représentées. La majorité des espèces observées sont des pionnières des milieux secs et certainement plus tolérantes à la pollution. Rappelons que les bryophytes sont d'excellents indicateurs de la qualité du milieu naturel. Dépourvues de système vasculaire développé et de racines, elles sont directement exposées aux variations du milieu et donc très sensibles à toute modification de leur habitat. Les bryophytes répondent rapidement à toute perturbation environnementale de diverses façons, notamment par des changements dans les communautés d'espèces. Leur prédisposition à la bio-accumulation nous permet également de suivre la concentration en polluants de l'environnement. Ce sont également de bons indicateurs de l'état de conservation de nombreux habitats naturels, notamment d'habitats d'intérêt communautaire.

Sur les parties bétonnées bordant les toitures, et non pas au cœur de la végétation, les inventaires ont relevé la présence de *Grimmia pulvinata* et *Tortula muralis* qui sont très communes dans ces conditions.



→ Plusieurs espèces typiques des milieux ensoleillés et secs ont été observées principalement sur les toitures à Sedum : *Brachythecium albicans*, *Homalothecium lutescens*, *Polytrichum juniperinum*, *Tortula squarosa*, *Racomitrium canescens* pour les plus communes. Les toitures végétalisées qui bénéficient d'endroits ombragés et humides permettent un certain enrichissement en Hépatique à thalle, plutôt rare sur les toitures : *Lunularia cruciata*, *Marchantia polymorpha* (à noter qu'aucune hépatique à feuilles n'a été trouvée).

17 espèces n'ont été observées que dans 1 à 2 stations, soit des espèces liées à une situation particulière (partie ombragée et humide) : *Fissidens taxifolius*, *Lunularia cruciata*, *Marchantia polymorpha*, *Callergionella cuspidata* soit à des conditions très sèches, anciennes ou liées à la provenance du substrat (*Bryum radiculosum*, *Didymodon luridus*, *Encalypta vulgaris*, *Pseudoscleropodium purum*, *Racomitrium canescens*, *Tortella squarosa*, *Tortula cuspidatum*, *Homalothecium sericeum*, *Orthotrichum anomalum*, *Orthotrichum diaphanum*, *Pseudocrossidium hornsuschianum*), une espèce forestière (*Fissidens bryoides*) et une invasive peu répandue en ville (*Campylopus introflexus*). A noter que la présence d'*Oxyrhygium hians* trouvé à quelques reprises peut être un marqueur de l'ancienneté de la végétalisation de la toiture et de sa propension à retenir l'eau.

Quelques tendances particulières se dégagent : RUWAT est la toiture la plus riche avec 20 taxons (et 6 Lichens) suivie de AMROU avec 17 taxons (liés à la diversité de milieu sur plusieurs petites toitures, partie en friche et en sedum). Une seule toiture (FAUTEM) ne possède pas de bryophytes, en raison de la présence de mulch de bois raméal fragmenté en couche épaisse à sa surface. Quant à la toiture spontanée du CD93, elle est la plus riche en bryophytes, probablement du fait de son ancienneté et de la diversité de son exposition. D'autres tendances, plus générales, s'observent. Sur une grande majorité des toitures, la diversité varie de 7 à 10 taxons. Les toitures les plus anciennement installées semblent être les plus riches en bryophytes (20 bryophytes sur RUWAT, 17 sur AMROU, 11 sur WWF, 12 sur CD93). Les toitures à orpins sont, de manière générale les plus riches en bryophytes. En ce qui concerne la surface, les grandes toitures sont plus riches (CIMOB, PAREX), sauf si elles abritent une forte densité d'herbacées (SEINE). Les toitures prairiales qui offrent des zones nues ou peu denses, parfois légèrement humides, peuvent être aussi riches que des toitures à orpins (PULMA, GTMBA, CHAVIN, CIROB, MOZINOR). *A contrario*, les toitures prairiales très denses ou gérées avec du mulch sont très pauvres en bryophytes. Enfin, la provenance des caissettes à orpins ou du substrat (pouzzolane) peut avoir une influence certaine sur la diversité (ex : PAREX, ROROL : toiture diversifiée et pourtant jeune).



Les toitures à orpins sont les plus riches en bryophytes © Audrey Muratet | ARB idF



La toiture du Parc des expositions de Paris Villepinte héberge également de la Ciboulette (*Allium schoenoprasum*) © Audrey Muratet | ARB îdF



Hemminki Johan se prépare pour une session
Sipoll sur la toiture de l'école de la biodiversité de
Boulogne-Billancourt © Audrey Muratet | ARB idF

#4

LES INVERTÉBRÉS DES TOITURES VÉGÉTALISÉES

Les invertébrés sont caractérisés par une très grande diversité d'espèces et d'écologies. Largement représentés en milieu urbain, ils sont de bons indicateurs des caractéristiques du milieu (humidité, température, disponibilité des ressources, etc.)

L'étude de ces derniers, à travers les compositions en prédateurs, décomposeurs, proies, pollinisateurs, nous renseigne sur la capacité des toitures à les accueillir et sur leur rôle dans ces nouveaux écosystèmes.

La description des communautés d'arthropodes nous permet de considérer les toitures comme des habitats de substitution potentiels. Cependant, la diversité des modes de conception et de gestion des toitures peut impacter les communautés d'arthropodes. Il est donc nécessaire de cerner les paramètres optimisant l'accueil de cette nature urbaine.

INVENTAIRE DES INVERTÉBRÉS

PROCOLE



Pour les invertébrés terrestres, le protocole correspond à un système d'échantillonnage par transect. Deux techniques ont été utilisées : un prélèvement de tous les invertébrés du sol à l'aide d'un aspirateur à bouche (9 min) et un second prélèvement à l'aide d'un filet fauchoir (1 min). Deux passages espacés d'un mois (entre mai et fin juillet) ont été réalisés chaque année pendant trois ans. La détermination des invertébrés collectés nécessite un travail *a posteriori* en laboratoire.

Les pollinisateurs ont quant à eux été inventoriés grâce au programme de science participative SPIPOLL (Suivi Photographique des Insectes POLLinisateurs) développé par le MNHN. Le protocole vise à photographier pendant 20 minutes les interactions entre les insectes pollinisateurs et un massif de fleurs d'une espèce sélectionnée. Les clichés sont ensuite saisis sur une base de données nationale, avec des informations sur l'environnement, ce qui permet la comparaison des toitures avec d'autres espaces de nature.



Réalisation du protocole SPIPOLL sur la toiture de la Cité de la mode et du design à Paris © Gilles Lecuir | ARB îdF

L'étude des invertébrés sur les toitures nous permet de montrer qu'au-delà d'une vie bien présente sur les toits, celle-ci est diversifiée et fonctionnelle. On constate une diversité importante en espèces dans de nombreux groupes taxonomiques : isopodes (cloportes), myriapodes (mille-pattes) et collemboles qui se chargent du recyclage de la matière organique. Plus haut dans la chaîne trophique, les phytophages sont largement représentés par les coléoptères, orthoptères (criquets, sauterelles) et hémiptères (punaises, cicadelles). Conséquence de cette diversité, des cortèges d'arthropodes prédateurs sont présents avec les araignées, hyménoptères et certains coléoptères. Au total ce sont 611 espèces d'invertébrés qui ont été identifiées entre 2017 et 2019.

Parallèlement à l'étude de la diversité en espèces, une estimation relative de l'abondance de chaque ordre d'insecte a également été réalisée. On constate la nette dominance des hémiptères (punaises), hyménoptères, araignées et coléoptères sur les toitures en nombre d'individus. Les punaises, adaptées à une multitude d'environnements sont capables de réaliser de véritables explosions de population quand les conditions sont favorables. C'est notamment le cas des représentants du genre *Nysius* qui ont été observés à des densités remarquables sur certains sites. Ce genre est généralement affilié aux milieux chauds et secs et, en conséquence, largement représenté en zone méditerranéenne. Sur les toitures de l'étude, 3 espèces différentes ont été retrouvées avec parfois des densités de populations remarquables notamment sur les toitures extensives.

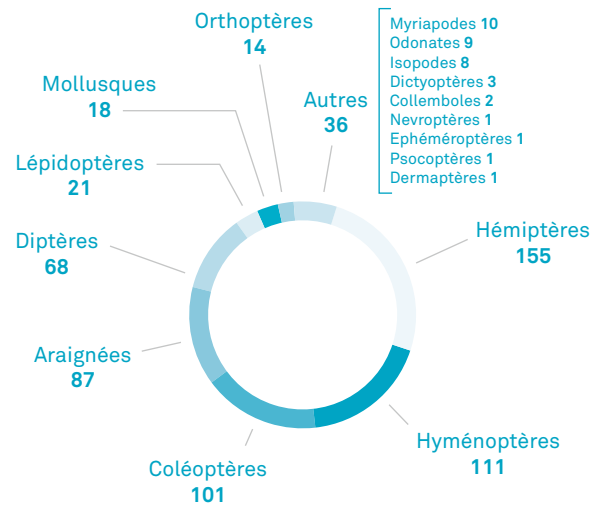


FIGURE 11 Nombre d'espèces d'invertébrés par groupe taxonomique © ARB idF

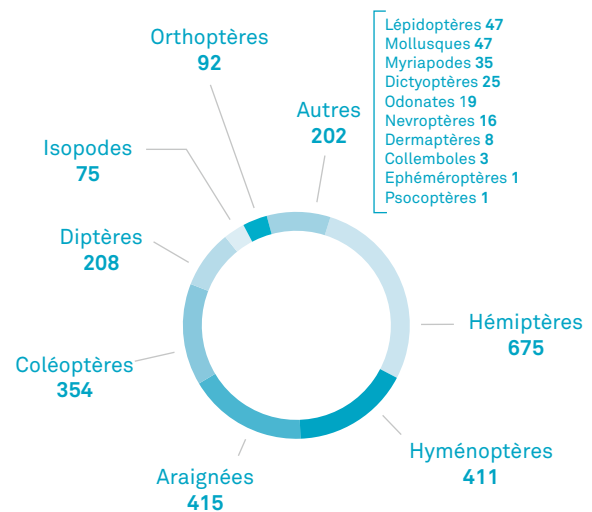


FIGURE 12 Les hémiptères (punaises), hyménoptères, araignées et coléoptères sont les groupes taxonomiques les plus abondants sur les toitures végétalisées © ARB idF



DES ESPÈCES PARASITOÏDES SUR LES TOITURES !

Un parasitoïde est un organisme qui se développe sur ou à l'intérieur d'un autre organisme dit « hôte » et qui tue inévitablement ce dernier au cours ou à la fin de son développement, alors que de nombreux parasites ne tuent pas leur hôte. Les insectes parasitoïdes sont dépendants d'une gamme plus ou moins diversifiée d'hôtes servant pour l'alimentation de leurs larves. Sur les toitures, la présence de ces espèces, aux capacités de dispersion souvent limitées, sous-entend l'existence de cortèges d'invertébrés suffisamment diversifiés et nombreux pour satisfaire leurs exigences. Les parasitoïdes sont considérés comme des régulateurs de populations, au même titre que les maladies, et interviennent naturellement dans la stabilisation des écosystèmes. Leur présence est donc considérée comme indicatrice de la fonctionnalité du milieu.

Ainsi, les Dryinidae forment une famille d'hyménoptères asociaux méconnue du grand public. Rencontrés sur la toiture SIBUET, ces insectes de moins d'un demi-centimètre, à la morphologie évoquant une fourmi possèdent pourtant des caractéristiques uniques chez les hyménoptères. Les femelles, aptères, possèdent des pattes ravisseuses, à l'instar des mantes religieuses, qu'elles utilisent pour chasser des cicadelles. Au-delà d'une prédation directe, les cicadelles sont aussi des hôtes pour le développement des larves. Celles-ci restent fixées sur la victime et ponctionnent l'hémolymphe (équivalent du sang chez les insectes) de l'hôte pour se développer. Ce processus, létal pour la cicadelle, rend cette famille anecdotique intéressante pour la lutte biologique contre les cicadelles qui peuvent être responsables de la transmission de maladies aux végétaux. Parmi les hyménoptères, d'autres familles jouent également un rôle régulateur important. Sur les toitures, une diversité intéressante de Chrysidés (ou guêpes-coucou) a été rencontrée. Celles-ci sont spécialisées dans le parasitisme des larves d'abeilles et guêpes solitaires. Pour cela, une fois l'entrée du nid repérée, la femelle s'introduit discrètement et pond un œuf unique à côté du couvain de l'hôte.

Une fois éclos, la larve se nourrit dans un premier temps de la nourriture collectée par l'adulte pour sa larve, puis, finit par dévorer la larve de l'hôte. Il arrive parfois que la victime (généralement bien plus grosse que la Chryside) prenne en flagrant délit l'imposteur. Pour parer aux représailles, les chrysidés sont dotées d'une cuticule remarquablement épaisse et se roulent en boule pour éviter de subir des dégâts au niveau des parties fragiles. L'indésirable est alors jetée hors du nid faute de mieux, ce qui ne garantit en rien son abandon, les chrysidés étant réputés comme persévérantes.



Larve de Dryinidae parasitant une cicadelle
© Hemminki Johan | ARB îdF



Femelle Dryinidae adulte
© Hemminki Johan | ARB îdF



La Chryside, un parasitoïde spécialisé dans les abeilles et guêpes solitaires
© Ophélie Ricci | ARB îdF

La diversité est très fluctuante en fonction des toitures, avec des écarts importants entre les sites les moins riches (20 espèces) et ceux abritant le plus d'espèces (107 espèces). Comme mentionné dans la section précédente pour la flore, cette forte disparité sous entend l'importance de la méthode de conception pour la biodiversité : les toitures « semi-intensives » et « intensives » présentent des richesses comparables entre elles et plus élevées que les toitures « extensives ».

Pour les pollinisateurs, en comparaison aux espaces verts urbains, les toitures sont significativement moins riches en espèces si l'on regroupe l'ensemble des typologies. Néanmoins, en distinguant les typologies, la richesse des toitures « semi-intensives » et « intensives » devient statistiquement comparable à celle des espaces verts urbains. Ces résultats sont similaires si l'on étudie l'abondance et l'originalité des cortèges, les toitures « extensives » se placent en dessous des autres typologies.



La Philante apivore (*Philantus triangulum*), toiture BOUTOU
 © Hemminki Johan – ARB idF



Une Anthrène (*Anthrenus sp.*), toiture GOOPL
 © Lucile Dewulf | ARB idF

FIGURE 13A Richesse en espèce d'arthropodes terrestres en fonction des typologies de toitures. © ARB idF

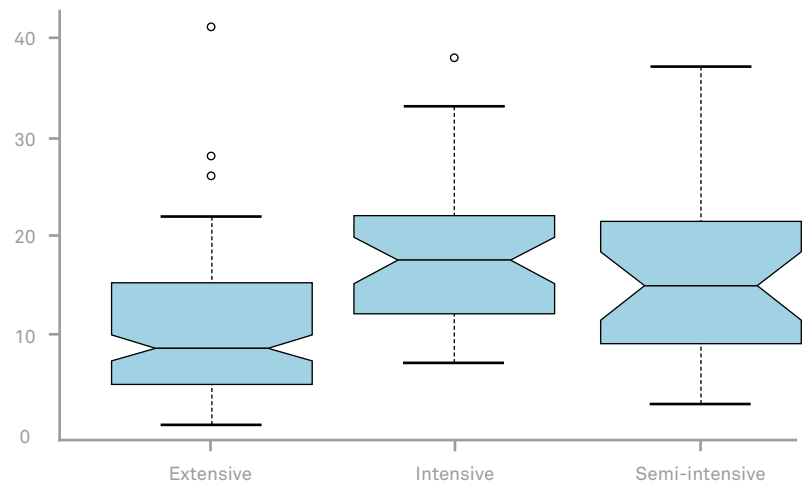
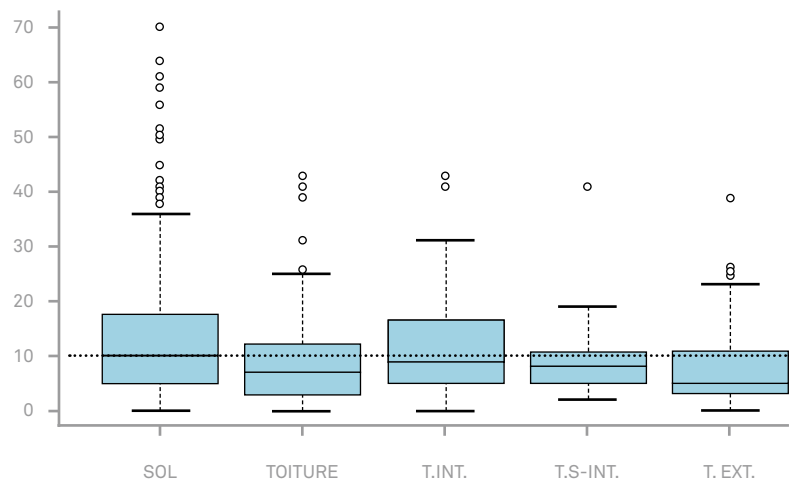
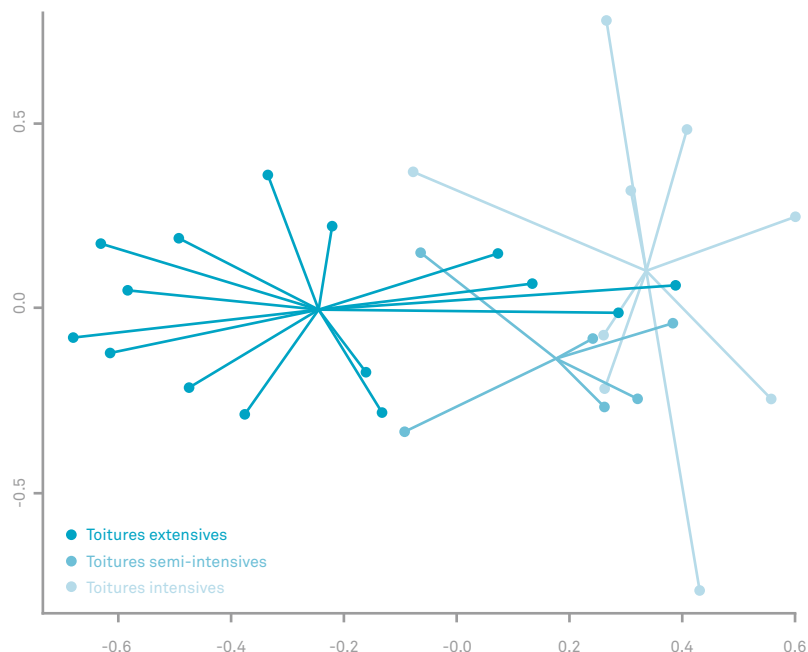


FIGURE 13B Richesse en insectes pollinisateurs en fonction des typologies de toitures. © ARB idF



Sur les toitures extensives, les conditions environnementales sont limitantes et s'apparentent à celles retrouvées dans des milieux très secs. A contrario, les toitures présentant des strates de végétation plus nombreuses et plus denses, dans lesquelles une humidité et un ombrage sont maintenus, offrent des conditions plus clémentes qui font varier la composition en arthropodes observés.

FIGURE 14 Répartition des communautés d'invertébrés en fonction des typologies de toitures. Sur cette analyse multidimensionnelle non métrique, les différentes toitures de l'étude GROOVES sont représentées par des points. Plus les points sont rapprochés entre eux, plus les communautés d'invertébrés sont similaires. © ARB idF



L'exploration des données recueillies nous permet de conclure sur une différence significative entre les assemblages d'espèces retrouvés sur les toitures extensives et ceux associés aux toitures intensives. Les toitures semi-intensives semblent quant à elles se situer à l'interface en offrant un habitat plus nuancé pour les invertébrés. Le choix du mode de conception est donc un facteur influençant directement la diversité que la toiture sera susceptible d'accueillir et conditionnera les espèces pouvant coloniser le milieu. Cette différence de cortège se retrouve également entre les toitures et le sol. En comparant les espèces les plus présentes sur les toitures avec celles des milieux urbains franciliens, on peut distinguer 3 groupes d'espèces réagissant différemment à cette infrastructure : les espèces « toiturophiles » normalement peu représentées dans la matrice urbaine mais très fréquentes sur les toitures (ex : *Runcinia grammica*,

Nysius graminicola, *Lygus pratensis*); les espèces très « généralistes », communes sur les toits et au sol (ex : le Gendarme (*Pyrrhocoris apterus*), l'Épeire diadème (*Aranea diadematus*), la Punaise verte (*Nezara viridula*)); les espèces « toiturophobes » peu représentées sur les toitures alors qu'elles sont communes au sol (ex : la Pisaure admirable (*Pisaura mirabilis*), la Punaise nébuleuse (*Raphigaster nebulosa*), la Corée marginée (*Coreus marginatus*)).

A l'instar des plantes retrouvées en dehors de leur aire de répartition naturelle, plusieurs espèces d'invertébrés à l'affinité méditerranéenne ou atlantique ont été identifiées et se pérennisent sur des toitures. Possédant de faibles capacités de dispersion, l'import sur les sites par le substrat ou les végétaux reste à étudier. Malgré tout, leur redondance dans les inventaires au long des trois années démontre leur acclimatation à ce nouvel environnement.



Exemple : 3 groupes d'espèces réagissant différemment aux toitures végétalisées.

A. L'Épeire diadème (*Aranea diadematus*), une espèce considérée comme généraliste © Audrey Muratet | ARB idF

B. La Corée marginée (*Coreus marginatus*), une espèce considérée comme « toiturophobe » © Maxime Zucca | ARB idF

C. *Nysius graminicola*, une espèce considérée comme « toiturophile » © Hemminki Johan | ARB idF



LES COLLEMBOLES : MÉCONNUS MAIS ESSENTIELS POUR LA FERTILITÉ DU SOL !

Par Céline Houssin et Louis Deharveng,
Institut de Systématique, Évolution, Biodiversité
(ISYEB - UMR7205 - CNRS, MNHN, UPMC, EPHE),
Sorbonne Université

Les Collemboles sont, avec les acariens, les principaux représentants des microarthropodes dans le sol. On en trouve de 10 000 à 100 000 dans un mètre carré de sol. Ils jouent un rôle essentiel pour la fertilité du sol, en participant à la création de microporosités (aération et enracinement), à la dégradation de la matière organique et donc à la circulation des nutriments. Ils sont de fait d'importants bio-indicateurs de la qualité des sols car leur nombre dépend de nombreux facteurs tels que la pollution, la disponibilité en eau et la quantité de matière organique. Longtemps considérés comme des insectes, les collemboles forment une classe à part entière chez les arthropodes. Ils sont classés au sein d'une trentaine de familles réparties en quatre ordres : *Poduromorpha*, *Entomobryomorpha*, *Neelipleona* et *Symphyleona*.

Dans le cadre de l'étude GROOVES, Céline Houssin et Louis Deharveng ont analysé les collemboles de 6 toitures végétalisées (1 intensive, 3 extensives, 1 semi-intensive et 1 « wildroof »). L'objectif était de rendre compte de la diversité de collemboles présente sur ces toits, de comparer ces toitures entre elles et à plus long terme, de faire un lien avec la diversité trouvée dans les jardins parisiens à proximité, mais aussi de mettre en relation l'abondance et la richesse des collemboles avec la présence des mycorhizes dont ils s'avèrent être des consommateurs (voir encadré sur les Mycorhizes).

La méthode d'extraction consiste à déposer chaque échantillon de sol sur un appareil de Berlese. Le berlese est constitué d'un tamis posé sur un entonnoir sous lequel a été mis un flacon contenant de l'alcool à 96° pour permettre la récupération de la faune présente dans le sol. Du fait de l'assèchement du substrat, les animaux finissent par tomber dans le tube.

Les toitures abritent une diversité intéressante en collemboles, variable selon les types de toits. La toiture intensive FAUTEM abrite 14 espèces issues de 3 familles différentes. La toiture semi-intensive CIMOD contient quant à elle 12 espèces de 3 familles différentes. Les toitures extensives RUWAT, BOUCHA et PERIS abritent respectivement 12, 4 et 5 espèces. Ces premiers résultats semblent indiquer une diversité plus importante sur les toitures semi-intensives et intensives. Mais c'est la toiture « wildroof » du bâtiment d'entomologie du MNHN qui présente la diversité la plus élevée avec 19 espèces. Les « wildroofs » pourraient s'avérer intéressants pour la faune du sol. Sur le bâtiment d'entomologie, suivi depuis plusieurs années, les analyses indiquent qu'au fil du temps, des espèces se pérennisent, quand d'autres apparaissent ou disparaissent de la toiture. Il semblerait donc que les collemboles soient particulièrement sensibles au type de substrat et que leur composition est susceptible d'évoluer avec le temps. Un suivi à plus long terme apparaît nécessaire pour confirmer ces évolutions ou observer un état de « maturité » avec des compositions plus stables.



Les collemboles sont des microarthropodes du sol et jouent un rôle essentiel pour sa fertilité. © iStock | Henrik_L



Carotte de substrat sur le bâtiment Mozinor
© Marc Barra | ARB idF

#5

LES SOLS ET SUBSTRATS DES TOITURES VÉGÉTALISÉES

Les sols assurent des fonctions indispensables (cycle de l'eau et du carbone, support pour les plantes, etc.), qui dépendent en grande partie de la biodiversité complexe qu'ils abritent. Sur les toitures végétalisées, on parle généralement de substrat car les sols ont été profondément remaniés et recomposés. Ils ne sont pour la plupart pas assimilables à de véritables sols, bien que des démarches de génie écologique visent aujourd'hui à reproduire des conditions plus naturelles.

Les substrats utilisés pour la construction des toitures végétalisées peuvent avoir des origines et des compositions très variables, allant de terres décapées d'environnements naturels ou agricoles jusqu'à des substrats construits par le mélange de différentes sources (fraction minérale – brique concassée, pouzzolane, perlite - mélangée avec une fraction organique, terre agricole, compost, remblais, etc.). Cette profonde hétérogénéité, mais aussi la méconnaissance de ces sols « aériens », nous ont amenés à réaliser des analyses approfondies de leurs qualités physiques, chimiques et biologiques.

INVENTAIRE DE LA QUALITÉ DES SOLS

Le protocole d'étude des sols ou substrats des toitures végétalisées a été imaginé spécifiquement pour cette étude avec l'aide d'IEES-Paris et de l'INRAE Dijon. Pour chaque toiture, 10 points de prélèvement (carottes) ont été réalisés sur une épaisseur maximale de 12 cm à l'aide d'un transplantoir à bulbes. Les points de prélèvement étaient répartis de manière aléatoire. Les 10 échantillons sont assemblés et envoyés au laboratoire d'analyse de sol Aurea. Selon les toitures, le volume de substrat récupéré avoisinait les 6 litres. Les analyses effectuées par le laboratoire concernaient les paramètres physicochimiques (pH, granulométrie, CEC, éléments nutritifs, Eléments Traces Métalliques (ETM), etc.); biologiques (biomasse microbienne, matière organique, azote, etc.) et physiques (rétention maximale en eau, porosité, réserve utile, etc.). En parallèle de ces mesures, des échantillons ont également été récupérés par l'INRAE Dijon afin d'évaluer la qualité microbiologique des substrats, par l'étude de l'ADN environnemental. Pour ce faire, nous avons récupéré sur chaque toiture des échantillons (15mL) de substrats au niveau des 10 points de prélèvement. 3 d'entre eux ont été analysés de façon indépendante afin de capter l'hétérogénéité spatiale. Après réception au laboratoire des échantillons prélevés au terrain, les sols ont été lyophilisés puis tamisés, broyés et conservés à -40°C en vue des analyses de biologie moléculaire. La qualité microbiologique des sols de toiture a été appréhendée par l'utilisation de 3 indicateurs mesurés par des outils de biologie moléculaire à partir de l'ADN microbien extrait du sol (biomasse moléculaire microbienne, ratio densité champignons-bactéries, diversité de communautés de bactéries et de champignons).



Jonathan Flandin effectue des prélèvements d'échantillons de sols en conditions stériles © Marc Barra | ARB idF

La biomasse moléculaire microbienne permet d'estimer l'abondance totale des microorganismes du sol. Elle est mesurée par quantification de l'ADN microbien extrait à partir de l'échantillon de sol. C'est un indicateur d'impact, puisqu'il est sensible aux perturbations des sols, aux différentes contaminations et aux activités anthropiques (e.g. pratiques agricoles). Une perte de biomasse moléculaire microbienne traduit une perte dans le fonctionnement biologique et par conséquent une perte dans les services écosystémiques rendus. Plusieurs étapes sont nécessaires afin d'obtenir ce bio-indicateur. Brièvement, cela consiste à extraire les ADNs génomiques totaux, puis à purifier ces ADNs « bruts » et à les doser par fluorescence.

Le ratio densité de champignons/densité de bactéries correspond au rapport entre le nombre de champignons et celui de bactéries. Il permet de caractériser un éventuel déséquilibre microbien qui peut avoir des répercussions sur le fonctionnement biologique du sol comme la minéralisation de la matière organique. Le nombre de bactéries et de champignons est obtenu par une technique de PCR quantitative à partir de l'extrait d'ADN.

La diversité microbienne correspond à la richesse en termes de nombre d'espèces pour les bactéries et pour les champignons. Cette quantification s'appuie sur une technique de biologie moléculaire appelée le séquençage massif qui permet d'identifier en haut débit, les gènes des bactéries et des champignons présents dans l'échantillon. Ces richesses renseignent sur le potentiel de fonctionnement et la stabilité biologique du sol, en lien direct avec la qualité et la durabilité des écosystèmes. De plus, cette technique permet aussi de décrire les différentes espèces ou groupes taxonomiques présents dans la communauté.

A chacun des 10 points de prélèvement de substrat, les plantes ont été prélevées et mises sous enveloppe avec leurs racines pour l'identification des endomycorhizes, effectuée par les chercheurs Laurent Palka et Yves Bertheau du Muséum national d'Histoire naturelle. Enfin, pour chaque toiture, l'épaisseur du substrat a été mesurée à l'aide d'une tige en acier et d'un mètre pour l'ensemble des sites de prélèvement. La profondeur moyenne a ensuite été calculée.

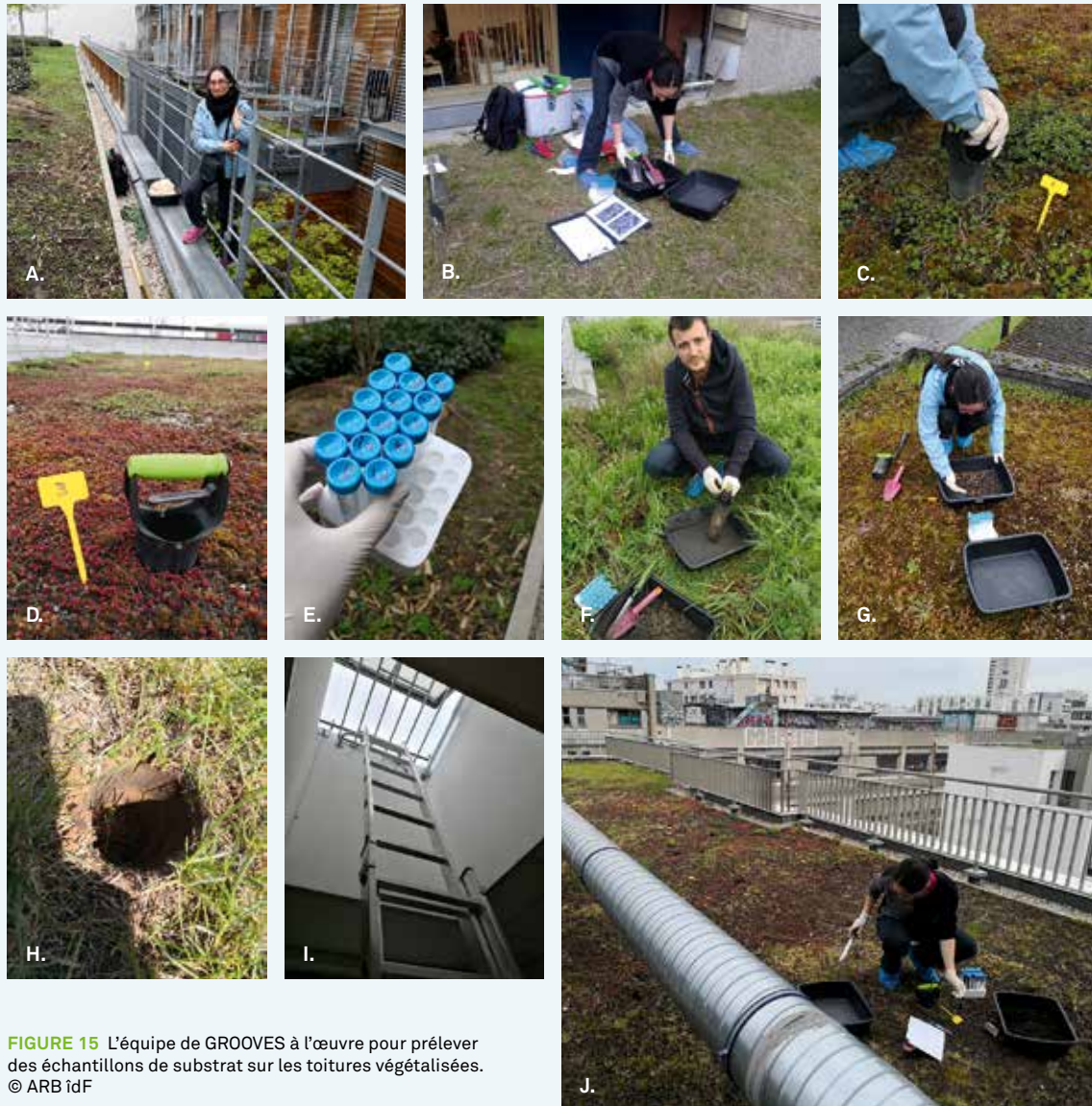
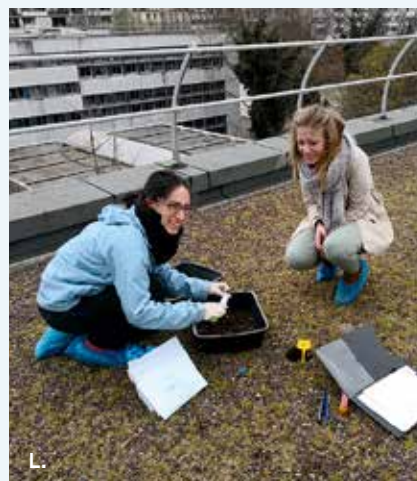


FIGURE 15 L'équipe de GROOVES à l'œuvre pour prélever des échantillons de substrat sur les toitures végétalisées. © ARB idF

- A. Accès à la toiture végétalisée d'une résidence Paris Habitat
- B. Matériel nécessaire pour le protocole « substrat »
- C. et H. Prélèvement de substrat à l'aide d'un transplantoir à bulbes
- D. Jalons utilisés pour déterminer les points de prélèvement
- E. Tubes « Falcon » de 15mL utilisés pour les analyses de la biomasse microbienne
- F. et G. Mélange des différents prélèvements de substrats
- I. Accès à la toiture par la trappe incendie
- J. Prélèvement dans une résidence Paris Habitat
- K. Conditionnement du substrat pour envoi au laboratoire d'analyses Auréa
- L. Enveloppes pour le prélèvement des plantes en vue de l'analyse des mycorhizes.



LES SUBSTRATS DES TOITURES VÉGÉTALISÉES : UNE COMPOSITION TRÈS VARIABLE

Les analyses en laboratoire nous ont permis de classer les substrats en fonction de leur teneur en éléments grossiers (refus à 8 mm et 2 mm). La teneur en éléments grossiers est plus importante pour les toitures extensives (en moyenne 38,7 % contre 6,3 % pour les toitures intensives), ces dernières étant souvent conçues avec une grande majorité de pouzzolane, brique concassée ou graviers. 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, ce qui illustre la diversité des modes de conception. Les éléments grossiers interviennent directement sur la porosité, la capacité de rétention hydrique et minérale, la vitesse de réchauffement et la résistance au tassement des sols.

Après tamisage, la fraction restante, appelée « terre fine » est utilisée pour les analyses de texture, autrement dit la composition d'un sol en sables, limons et argile. La teneur en argile est plus importante pour les toitures intensives que pour les extensives et inversement pour la teneur en sable. Grâce aux analyses effectuées par le GIS Sol et l'INRAE Orléans, les substrats des toitures végétalisées analysés dans GROOVES ont été comparés aux 2200 sols du RMQS (Réseau de Mesures de la Qualité des Sols) dans un triangle des textures, ce qui permet de positionner les sols des toitures par rapport à des sols « naturels » à l'échelle du territoire national.

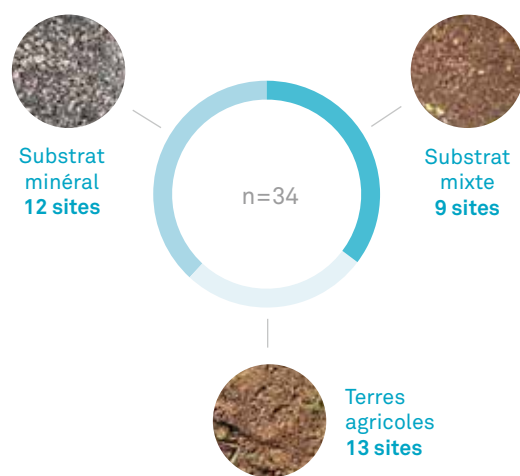
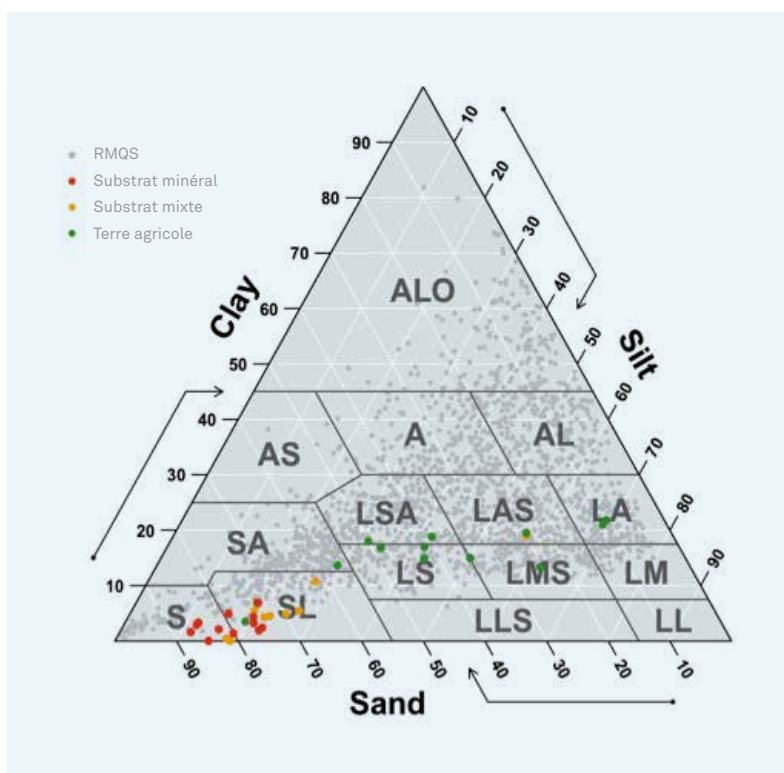


FIGURE 16 Répartition des substrats en fonction de la teneur en éléments grossiers. © ARB idF

Pour soucis de simplification, les substrats ont été répartis en 3 catégories fondées sur leur apparence principale : terre agricole, substrat mixte (éléments terreux et minéraux) et substrat minéral (plus de 80 % d'éléments grossiers de type pouzzolane). Les échantillons de toitures végétalisées « substrat minéral » et « substrat mixte » se positionnent tous dans les classes « sablo-limoneux » et « sableux ». Les échantillons de type « terre agricole » se positionnent quant à eux dans des classes texturales

FIGURE 17 les 34 toitures étudiées ont été positionnées dans le triangle des textures. Les points gris correspondent aux sols du RMQS.
© GIS Sol - INRAE Orléans.



plus classiquement observées à l'échelle du territoire national. Les sols de toitures présentent des niveaux de pH, et surtout des teneurs en carbone organique significativement plus élevés en comparaison des sols du référentiel national. Ces résultats montrent globalement que les sols de toitures végétalisées présentent des caractéristiques physicochimiques très particulières, avec des combinaisons de propriétés texturales-chimiques qui ne sont pas représentées dans le référentiel national des sols du RMQS (GIS Sol, INRAE Orléans).

Du côté des analyses biologiques, le rapport carbone sur azote (C/N) est un indicateur de la capacité de la matière organique à se décomposer. Utilisé principalement en agriculture, il peut permettre de rendre compte de l'activité biologique des sols (degré d'évolution de la matière organique, potentiel de fourniture d'azote par le sol aux plantes). Les toitures végétalisées étudiées dans GROOVES ont pour la plupart un rapport C/N élevé, supérieur à la normale (pour 10 d'entre elles), ce qui signifie que la décomposition de la matière organique est plutôt lente. On parle d'un sol à activité biologique réduite. Globalement, les toitures extensives semblent avoir un C/N plus élevé que les toitures semi-intensives et intensives, mais cela ne ressort pas de manière significative dans les analyses statistiques. Attention toutefois de garder à l'esprit que le rapport C/N reste un indicateur utilisé en agronomie, dont l'interprétation en écologie urbaine est délicate...

Le rapport C/N est corrélé positivement à la richesse floristique. Cela pourrait suggérer que les substrats à faible C/N (décomposition de la matière organique plus rapide), sont ceux qui sont colonisés avec des couverts peu diversifiés. Les autres substrats, sans doute plus complexes, avec une variabilité de ressources plus importantes, seraient plus propices à la diversification de la flore.

De nombreux autres indicateurs de la qualité du sol ont été effectués par le laboratoire, comme la capacité d'échange cationique ou la caractérisation des matières organiques, mais ne s'avèrent pas nécessairement plus faciles à interpréter. Des analyses de la biomasse bactérienne ont également été effectuées et convergent avec celles de l'INRAE Dijon présentée plus loin dans ce chapitre.

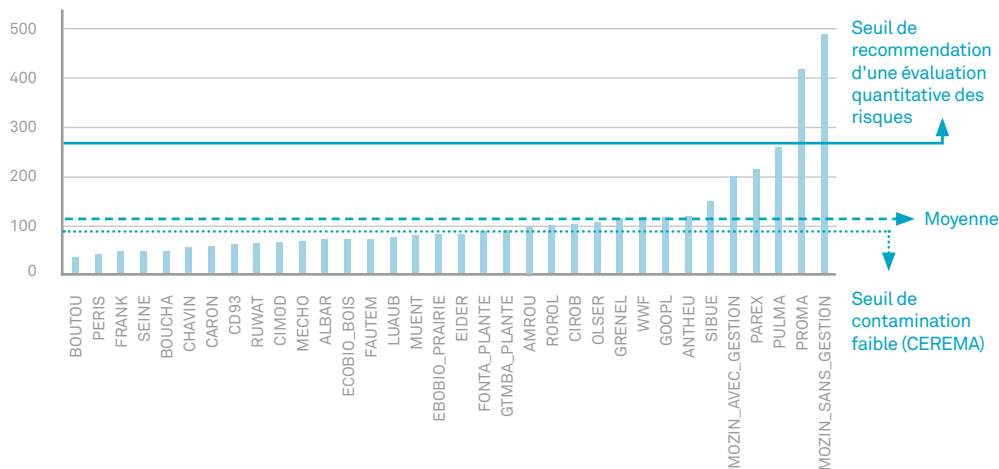
Jonathan Flandin et Marc Barra
 prélèvent du substrat sur le toit du
 cinéma Robespierre à Vitry-sur-Seine
 © Audrey Muratet | ARB idF

POLLUTION AUX ÉLÉMENTS TRACE MÉTALLIQUES (ETM)

Les éléments traces métalliques (ETM), tel le cuivre (Cu), le plomb (Pb), ou le cadmium (Cd), sont présents dans les sols à des teneurs très faibles (< 0,1%). Si certains de ces éléments sont nécessaires à la vie (oligo-éléments), ils peuvent devenir toxiques si trop abondants ou présents sous certaines formes chimiques. Les ETMs contenus dans les substrats de 34 toitures ont été analysés. Si la grande majorité d'entre elles ne présentent pas de pollution notable, quelques-unes révèlent des taux particulièrement élevés en plomb et en zinc, au-delà des seuils de risques. Il est particulièrement difficile, voire impossible, de retracer l'origine de ces pollutions. Ces dernières pouvant provenir de substrats préalablement contaminés avant leur mise en œuvre sur la toiture ou de dépôts atmosphériques accumulés au fil des années. Néanmoins, la mesure des teneurs en ETM peut-être très utile aux gestionnaires, que ce soit pour éviter les risques de contamination lorsque les toitures sont accessibles au grand public (par ex. dans les écoles) ou lors d'opérations d'entretien. L'origine anthropique de zinc peut résulter d'activités minières et industrielles, du trafic routier ou encore de l'érosion des toitures et gouttières. En France, le seuil de contamination faible admis par le Cerema est fixé à 88 mg/kg (le faible dépassement de ce seuil n'induit pas nécessairement une pollution). Le programme REFUGE (Risques en Fermes Urbaines : Gestion et Evaluation) préconise quant à lui de mettre en place une Évaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS) à partir de 264 mg/kg.



FIGURE 18
Teneurs totales
en zinc dans
les substrats
des toitures
végétalisées
© ARB îdF



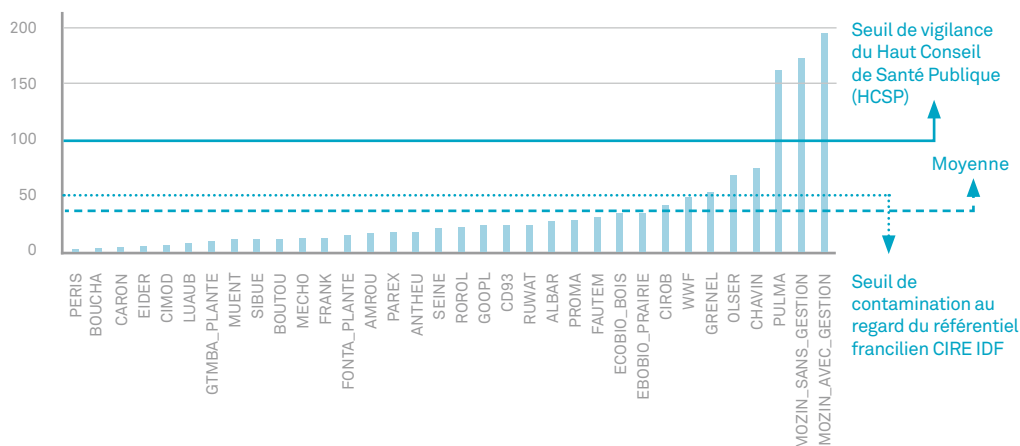
Les teneurs en zinc des toitures végétalisées étudiées varient de 36,73 mg/Kg pour la plus faible (BOUTOU) à 487,87 mg/Kg pour la plus forte (MOZIN). 14 d'entre elles dépassent le seuil de contamination faible proposé par le Cerema tandis que 2 d'entre elles (PROMA et MOZIN) présentent des valeurs comprises entre 400 et 600 mg/kg, au-delà du seuil REFUGE pouvant potentiellement présenter un risque de toxicité. A noter que si la toiture PROMA est située sur un bâtiment de protection infantile, elle n'est pas accessible pour le personnel.

Selon l'Agence Régionale de Santé Île-de-France, une concentration en plomb dans les sols superficiels de 53,7 mg/kg est habituellement retenue en Île-de-France comme seuil de contamination, au regard du référentiel francilien des terres agricoles, à partir duquel on considère qu'il existe une anomalie pouvant signifier la trace d'une pollution d'origine humaine. Le seuil de vigilance du Haut Conseil de la Santé publique (HSCP), qui indique le déclenchement d'une évaluation des risques sanitaires, est fixé à 100 mg/kg. Enfin, le seuil nécessitant un dépistage du saturnisme pour les personnes exposées s'élève à 300 mg/Kg.

Les teneurs en plomb des toitures végétalisées étudiées varient de 3,64 mg/kg (PERIS) à 196,25mg/Kg (MOZIN) pour la plus élevée. 5 toitures dépassent le seuil de contamination fixé par le HSCP et 2 d'entre

elles (CHAVIN et MOZIN) dépassent le seuil de vigilance. À noter que la toiture MOZIN est accessible au personnel et régulièrement entretenue. En 2017, IEES-Paris, avec le soutien de l'ARB îdF, a encadré la thèse de Ludovic Foti sur la qualité des sols franciliens. Ce dernier a notamment évalué la concentration en éléments traces métalliques le long d'un gradient rural-urbain dans les sols de pelouses et de bois en région parisienne. Le trafic routier a été identifié comme la principale source de pollution anthropique en ETMs. La seconde source identifiée pour le cadmium correspondrait à l'activité industrielle de la région parisienne, notamment à celle des usines à ciment. L'histoire de l'usage des sols a été identifiée comme étant un facteur clé de compréhension des niveaux de contamination et de pollution des sols par les ETMs. Selon ces travaux, la concentration des ETMs d'origine anthropique augmente selon un gradient du rural vers l'urbain, et la concentration de la plupart des ETMs en milieu urbain est équivalente ou supérieure aux valeurs de référence réglementaires, posant la question d'un suivi à long terme. A titre d'exemple, les valeurs relevées dans les pelouses et bois urbains par L. Foti sont en moyenne de 99 mg/kg dans les pelouses et de 188 mg/kg dans les bois pour le plomb, tandis que pour le zinc, elles se trouvent à une moyenne de 106 mg/kg dans les pelouses et 75 mg/kg dans les bois.

FIGURE 19
Teneurs totales
en plomb
(concentration
en mg/kg) dans
les substrats
des toitures
végétalisées
© ARB îdF





Le miel des abeilles domestiques peut faire office de bio-indicateur à proximité de sources de pollutions. © Marc Barra | ARB îdF

Le 15 avril 2019, Notre-Dame de Paris était victime d'un incendie dévastateur. Les fumées dégagées par l'évènement, chargées en métaux lourds, ont alors parcouru la capitale et les éléments ont fini par se précipiter sur les sols. Une étude [15] publiée en 2020 s'est intéressée aux conséquences de cette pollution et a démontré que le miel des ruches, situées sur le passage des fumées, présentait des concentrations en plomb significativement supérieures aux autres. Les ruches font alors office

de bio-indicateur de l'évènement polluant. Les toitures végétalisées étant particulièrement exposées à ce genre de pollutions aériennes, il serait légitime d'envisager la présence de trace de cet évènement sur celles-ci. Par ailleurs, si les abeilles domestiques constituent d'excellentes bio-indicatrices, gardons à l'esprit qu'il existe des compétitions entre elles et les autres pollinisateurs sauvages et que l'excès de ruches en ville dense peut nuire à la biodiversité sauvage.

QUALITÉ MICROBIOLOGIQUE DES SOLS DE TOITURES VÉGÉTALISÉES

La biomasse moléculaire microbienne est l'indicateur quantitatif le plus global qui a été utilisé dans cette étude. Il rend compte de la quantité totale de microorganismes du sol. Cette analyse appelée « biomasse moléculaire microbienne » est aujourd'hui validée comme un indicateur de la qualité du sol reconnu par l'Observatoire national de la Biodiversité comme un indicateur national sol. La biomasse microbienne est sensible au type de sol mais aussi aux usages du sol (labour ou pesticides en agriculture) ou à la gestion en ce qui concerne les toitures (tassement, fertilisation, gestion des plantes).

La Figure 20 montre les valeurs de biomasse moléculaire mesurées dans les 34 toitures végétalisées. Elles sont mises en regard des valeurs mesurées dans les sols du RMQS.

D'une manière générale, les résultats montrent que les sols de toitures végétalisées présentent en moyenne des niveaux très élevés de biomasse microbienne (129.4 $\mu\text{g ADN/g sol}$), de l'ordre du double du niveau moyen mesuré avec le référentiel RMQS

(59.2 $\mu\text{g ADN/g sol}$). Ces valeurs élevées peuvent être expliquées notamment par les teneurs élevées en carbone organique observées dans ces toitures (via des apports de matières fraîches type compost). En effet, les microorganismes sont majoritairement hétérotrophes, et donc dépendants de la disponibilité en carbone organique pour leur développement. Lorsque l'on considère les sols de toitures végétalisées, nous observons globalement une très forte hétérogénéité des valeurs de biomasse microbienne entre les trois réplicats pour chacune des toitures analysées. Ceci est probablement lié à une forte hétérogénéité spatiale des paramètres physicochimiques au sein de chaque toiture. Cette hétérogénéité peut avoir différentes origines (modalité de construction et de mise en place du sol, couverture partielle du sol par la végétation...). Quoiqu'il en soit, la variabilité intra-toiture de la biomasse masque en partie la significativité des différences de biomasse microbienne observées entre les différentes toitures.

L'analyse de la biomasse moléculaire microbienne selon le type de substrat, les types de toiture, et le type de couvert végétal (toitures distinguées entre dominance en sedums, en herbacées ou en végétation « mixte ») montrent que le type de substrat n'influence

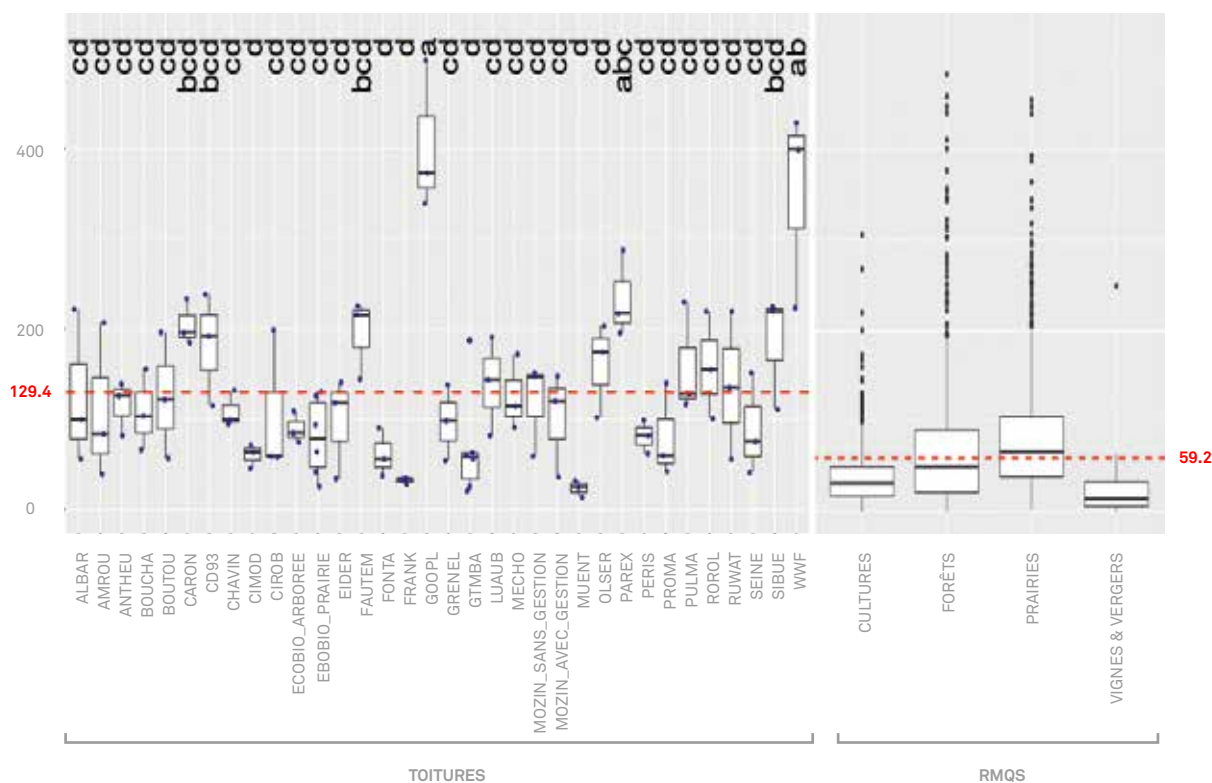


FIGURE 20 Biomasse moléculaire microbienne mesurée dans les échantillons pour chacune des 34 toitures (n=3 pour chaque toiture) ainsi que dans les sols du RMQS regroupés selon leur usage culture/forêt/prairie/vigne&vergers. Le trait rouge en pointillés représente la valeur moyenne de la biomasse moléculaire microbienne pour l'ensemble des échantillons de toitures (129.4 $\mu\text{g ADN/g sol}$) d'une part, et pour l'ensemble des sols du RMQS (59.2 $\mu\text{g ADN/g sol}$) d'autre part. © INRAE Dijon

pas significativement le niveau de biomasse moléculaire microbienne, même si on note une tendance à des niveaux inférieurs dans les sols « terre agricole » en comparaison des substrats mixtes et minéraux. Les toitures extensives présentent des niveaux de biomasse significativement plus élevés en comparaison des autres types de toitures semi-intensives et intensives.

De même, la nature du couvert végétal a une influence significative, avec des niveaux de biomasse globalement supérieurs sous une couverture « mixte », par rapport à des toitures dominées par les orpins (sedums) ou herbacées.

Pour affiner le diagnostic de la qualité microbiologique des toitures, nous avons appliqué le modèle de prédiction de la biomasse. Le diagnostic ainsi obtenu a montré des écarts extrêmement importants entre les valeurs mesurées et les valeurs de références respectives calculées par le modèle.

De tels écarts ne sont jamais observés dans des sols naturels. Ils s'expliquent par la grande particularité des sols de toiture en termes de propriétés physico-chimiques en comparaison avec des sols « naturels ». Quoi qu'il en soit, ceci questionne sur la robustesse du diagnostic établi par l'utilisation d'un référentiel construit à partir d'échantillons de sols « naturel ». En d'autres termes, ces résultats montrent l'importance de développer un référentiel propre aux toitures végétalisées pour pouvoir établir un diagnostic de la qualité microbiologique de ces sols.

Sur la base de ces résultats, nous avons pris la décision pour la suite du rapport de ne pas appliquer le modèle « biodiversité » pour diagnostiquer la qualité microbiologique des échantillons.



Prélèvement des échantillons de sols pour analyse en laboratoire.
 © Marc Barra | ARB idF

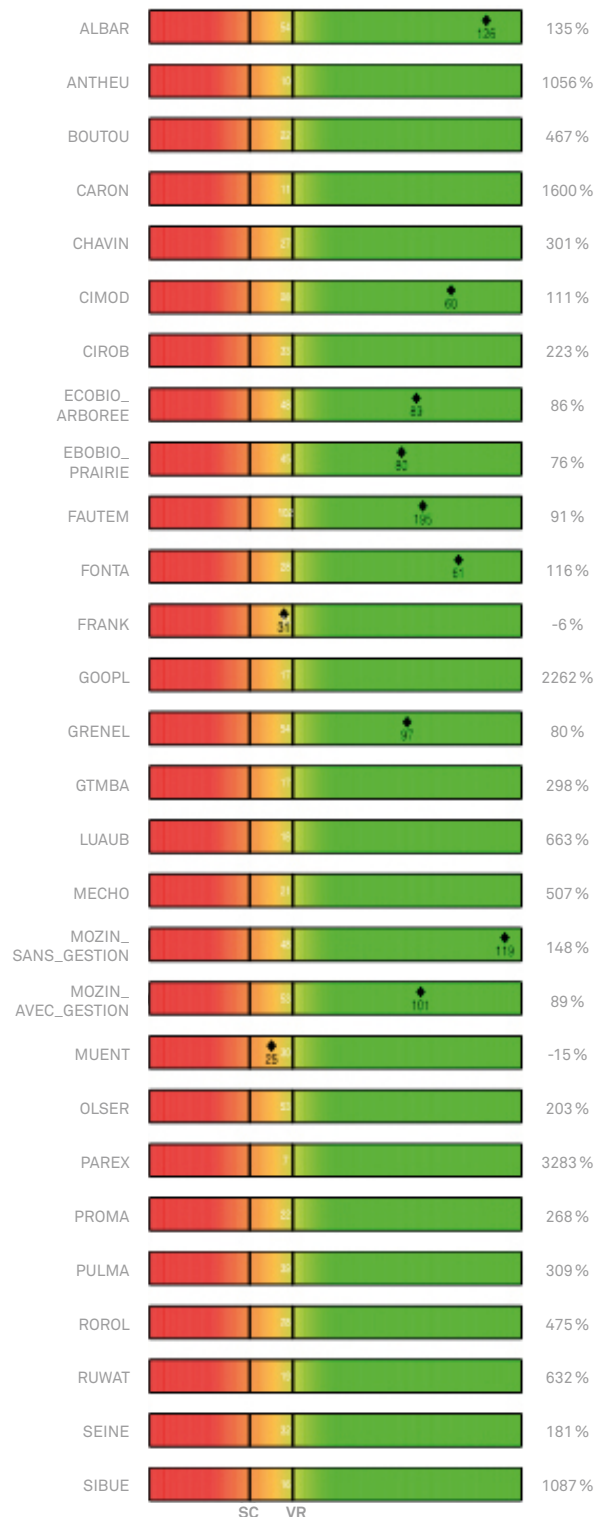


FIGURE 21 Diagnostic de la qualité microbiologique des toitures végétalisées en termes de niveaux de biomasse moléculaire microbienne. La valeur de référence (VR) correspond à la valeur déterminée par le modèle. Le seuil critique (SC) correspond au seuil en dessous duquel le fonctionnement du sol peut être altéré. Les pourcentages correspondent à la quantification de l'écart entre la valeur de référence et la valeur mesurée pour chaque toiture. © INRAE Dijon

Ratio champignons/bactéries : un équilibre microbien relatif...

L'analyse du ratio de la densité de champignons sur la densité de bactéries (ratio C/B) permet de détecter un éventuel déséquilibre microbien qui peut avoir des répercussions sur le fonctionnement biologique du sol. Le nombre de champignons et de bactéries est appréhendé par des techniques de biologie moléculaire qui consistent à quantifier les gènes taxonomiques microbiens (18S pour les champignons et 16S pour les bactéries [16] à partir de l'ADN extrait du sol). Dans les sols « naturels », ce ratio présente un optimum entre 1 et 5. Une valeur au-dessus indique une trop grande abondance en champignons et une valeur en dessous indique une trop grande abondance en bactéries. Dans les sols « naturels », ce ratio peut être influencé par différents facteurs comme le labour, l'apport de pesticides antimicrobiens, la quantité et la nature des apports organiques ou encore une contamination du sol avec certains métaux (type cuivre).

La figure ci-dessous présente les valeurs de ratio obtenues pour chacune des 34 toitures végétalisées.

Les résultats montrent que les toitures se positionnent globalement toutes dans la gamme optimale 1 à 5, mais plutôt avec des valeurs faibles (1,5 en moyenne). Ceci indique que les toitures abritent une communauté microbienne avec une « signature » plutôt bactérienne. A ce stade, plusieurs éléments pourraient contribuer à cette observation, dont notamment : une forte disponibilité en substrats organiques plutôt facilement dégradables, une forte exposition de ces toitures aux variations climatiques et en particulier à des cycles fréquents de sécheresse auxquels les champignons sont plus sensibles [17], une texture particulière des sols plus favorable au développement bactérien.

Comme pour la biomasse moléculaire, nous avons testé si la variabilité du ratio champignons/bactéries pouvait être expliquée par le type de substrat, le type de toiture ou le type de couvert végétal.

Le type de substrat et de couvert végétal influence de manière faible mais significative le ratio champignon/bactéries dans les toitures végétalisées. L'abondance relative des champignons au sein de la communauté microbienne augmente globalement dans les substrats minéraux et sous couvert d'orpins.

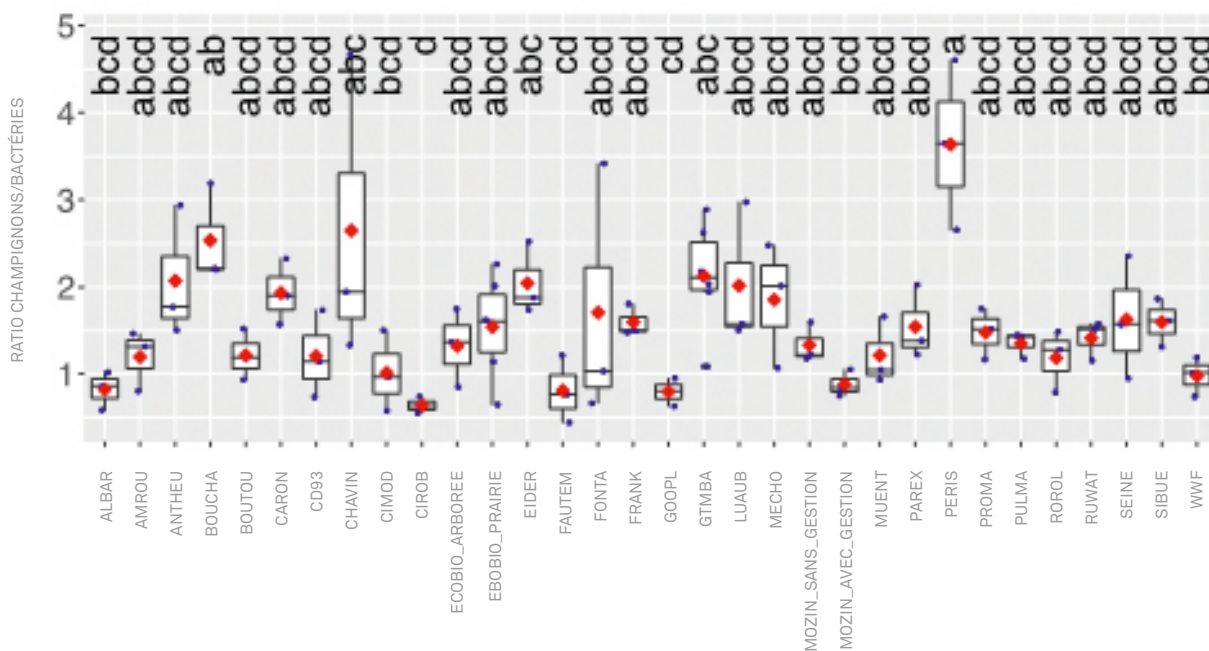


FIGURE 22 Equilibre microbien évalué par le calcul du ratio champignons/bactéries pour chacune des toitures. Pour chaque toiture, n=3 répétitions. © INRAE Dijon

Diversité et structure des communautés bactériennes : les toitures hébergent une très riche diversité bactérienne

La diversité taxonomique des bactéries et des champignons est obtenue par le séquençage massif des gènes taxonomiques 16S rRNA et 18S, respectivement, directement à partir de l'ADN du sol.

La diversité bactérienne est sensible au type de sol mais aussi aux usages du sol et notamment aux pratiques agricoles. Le labour, la bonne couverture du sol et l'apport d'amendements organiques ont généralement un effet positif sur la diversité des bactéries dans les sols « naturels » [18]. La figure ci-dessous représente les valeurs de diversité bactérienne mesurées dans les 34 toitures végétalisées.

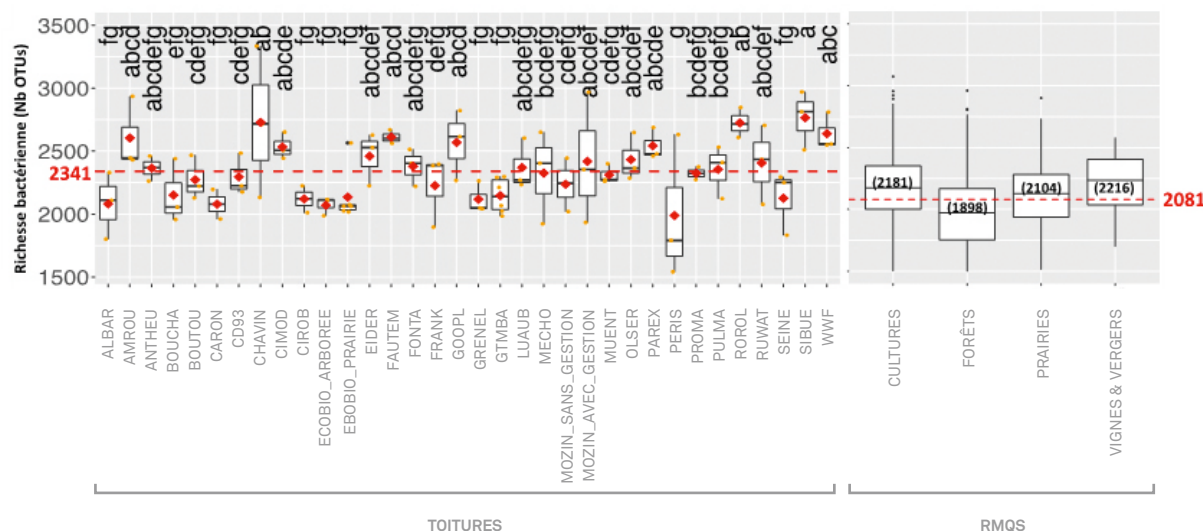


FIGURE 23 Diversité bactérienne mesurée dans les échantillons des 34 toitures végétalisées, mise en regard avec les valeurs obtenues dans les sols du RMQS regroupés selon leur usage culture/forêt/prairie/vigne&vergers. Le trait rouge en pointillés représente la valeur moyenne de la biomasse moléculaire microbienne pour l'ensemble des échantillons de toitures (2341 OTUs) d'une part, et pour l'ensemble des sols du RMQS (2081 OTUs) d'autre part. Les valeurs entre parenthèses correspondent à la richesse bactérienne moyenne pour chaque mode d'usage des sols du RMQS. © INRAE Dijon

Comme précédemment pour les autres indicateurs microbiens, les valeurs de diversité bactérienne sont très dispersées entre les trois réplicats pour la majorité des toitures, ce qui confirme une forte variabilité spatiale de ces espaces. Les différentes toitures présentent toutefois des valeurs moyennes de biodiversité bactérienne très variables, allant de 2071 OTUs pour le sol « Ecobio arboré » à 2765 OTUs pour le sol « Sibuet », montrant ainsi une forte disparité entre les toitures. Un résultat remarquable est qu'avec 2341 OTUs en moyenne, la diversité bactérienne des toitures végétalisées est supérieure à la moyenne des sols du RMQS (2081 OTUs). Indépendamment des propriétés physicochimiques particulières des sols de toiture (cf. section précédente), cette diversité élevée pourrait s'expliquer par le fait que ces environnements soient soumis à des stress fréquents (notamment liés aux fluctuations climatiques) limitant la sélection et l'exclusion compétitive favorisant ainsi la coexistence d'un nombre d'espèces important (hypothèse de la perturbation intermédiaire en écologie). On remarque ainsi que les niveaux de diversité des toitures sont plus proches de ceux des modes d'usages associés aux niveaux de perturbation les plus élevés des sols du RMQS (culture/Vignes&vergers). Cette hypothèse semble cohérente lorsque l'on évalue l'influence du type de substrat, de toiture ou de couvert végétal sur la richesse bactérienne.



La fausse Fléole (*Rostraria cristata*), une graminée adaptée aux toitures extensives. © Audrey Muratet | ARB iDF

La diversité bactérienne dans les toitures végétalisées selon le type de substrat, les types de toiture, et le type de couvert végétal montrent en effet que ce sont dans les toitures extensives les plus fines et donc les plus exposées aux variations climatiques que la diversité est la plus élevée. Ces toitures sont par ailleurs souvent réalisées avec des « substrats minéraux » ou « mixtes » qui sont des terres construites dont la structure et notamment la porosité n'offre probablement pas d'habitat tamponné pour les microorganismes (comme peut l'offrir une terre « naturelle »), accentuant encore l'exposition aux stress. Inversement, c'est dans les toitures de type « intensif » et dans les terres agricoles que la diversité est en moyenne inférieure.

Diversité et structure des communautés de champignons : les toitures hébergent une très riche diversité fongique

Les valeurs de diversité des communautés de champignons mesurées dans les 34 toitures sont représentées dans la Figure 24.

Un résultat remarquable est que la diversité des communautés de champignons est en moyenne plus élevée (999 OTUs) dans les sols de toiture en comparaison des sols naturels du référentiel RMQS (811 OTUs). Ceci montre à nouveau que les toitures sont des environnements propices au développement microbien.

Comme pour les autres indicateurs, nous observons une grande variabilité de la diversité fongique entre les trois réplicats pour chaque toiture. En dépit de cette variabilité indicatrice d'une forte variabilité spatiale des toitures, le niveau moyen de diversité fongique est très variable entre les toitures, montrant ainsi que toutes ne sont pas équivalentes en termes de conditions favorables au développement de ces communautés.

Contrairement à la biomasse moléculaire et à la diversité bactérienne, nos résultats ne montrent pas d'influence significative du type de toiture, de substrat ou de couvert végétal sur la richesse fongique des toitures végétalisées.

L'analyse de la structure génétique montre en revanche que ces communautés fongiques sont différentes entre les toitures extensives/semi-intensives d'une part, et intensives d'autre part en raison notamment d'une stimulation des Ascomycètes dans les toitures de type extensives/semi-intensives. De-même, les communautés sont différentes entre les terres agricoles et substrats mixtes d'une part, et les substrats minéraux d'autre part, toujours en raison d'une stimulation des Ascomycètes dans les substrats minéraux. Cette stimulation de ce groupe particulier peut s'expliquer par les traits écologiques qui lui sont attribués globalement dans la littérature : r-stratégies copiotrophes. Ces traits peuvent en effet conférer à ce groupe un avantage dans des toitures fines et donc fréquemment exposées aux aléas climatiques mais aussi riches en matière organique.



Malgré la faible profondeur des substrats de toitures végétalisées, la vie microbienne peut s'y épanouir.
© Marc Barra | ARB îdF

Les champignons mycorhiziens : un groupe d'intérêt très abondant sur les toitures végétalisées

Les champignons mycorhiziens sont des organismes symbiotiques qui ont un rôle très important dans la croissance et la santé des plantes. Cette symbiose est en effet reconnue pour augmenter la résistance des plantes aux stress hydriques et thermiques, mais aussi leur tolérance à certains polluants [19]. Ces effets pourraient donc être particulièrement bénéfiques dans des systèmes de toitures végétalisées en milieu urbain ; exposées à des niveaux de pollution atmosphérique élevés et à des stress hydriques et thermiques très fréquents.

L'analyse de ces communautés dans les échantillons de toitures végétalisées a montré un résultat remarquable, à savoir une augmentation importante de l'occurrence de ce groupe dans les sols de toitures (400 séq/10 000 en moyenne) en comparaison des sols naturels du référentiel RMQS (50 séq/10 000 en moyenne).

La stimulation de ce groupe fongique spécifique pourrait s'expliquer par l'environnement particulier que représentent les toitures en termes notamment d'exposition aux fluctuations des conditions climatiques, mais aussi aux pollutions atmosphériques. Ces conditions pourraient encourager l'établissement de la symbiose pour améliorer la survie du couvert végétal. Cette hypothèse semble confirmée par le fait que cette occurrence mycorhizienne est élevée et au même niveau quel que soit le type de toiture ou de substrat, mais qu'elle est impactée par le type de couvert avec une stimulation significative sous couvert mixte en comparaison des couverts d'orpins ou herbacés.

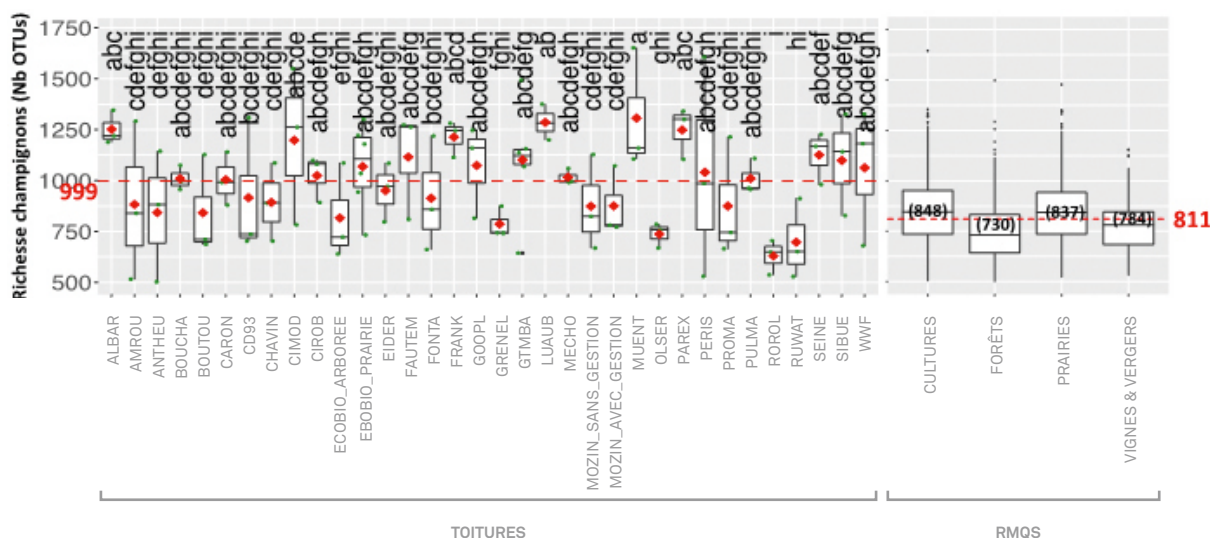


FIGURE 24 Diversité des communautés de champignons mesurée dans les toitures végétalisées, mise en regard avec les valeurs obtenues dans les sols du RMQS regroupés selon leur usage culture/forêt/prairie/vigne&vergers. Le trait rouge en pointillés représente la valeur moyenne de la biomasse moléculaire microbienne pour l'ensemble des échantillons de toitures (999 OTUs) d'une part, et pour l'ensemble des sols du RMQS (811 OTUs) d'autre part. Les valeurs entre parenthèses correspondent à la richesse bactérienne moyenne pour chaque mode d'usage des sols du RMQS. © INRAE Dijon

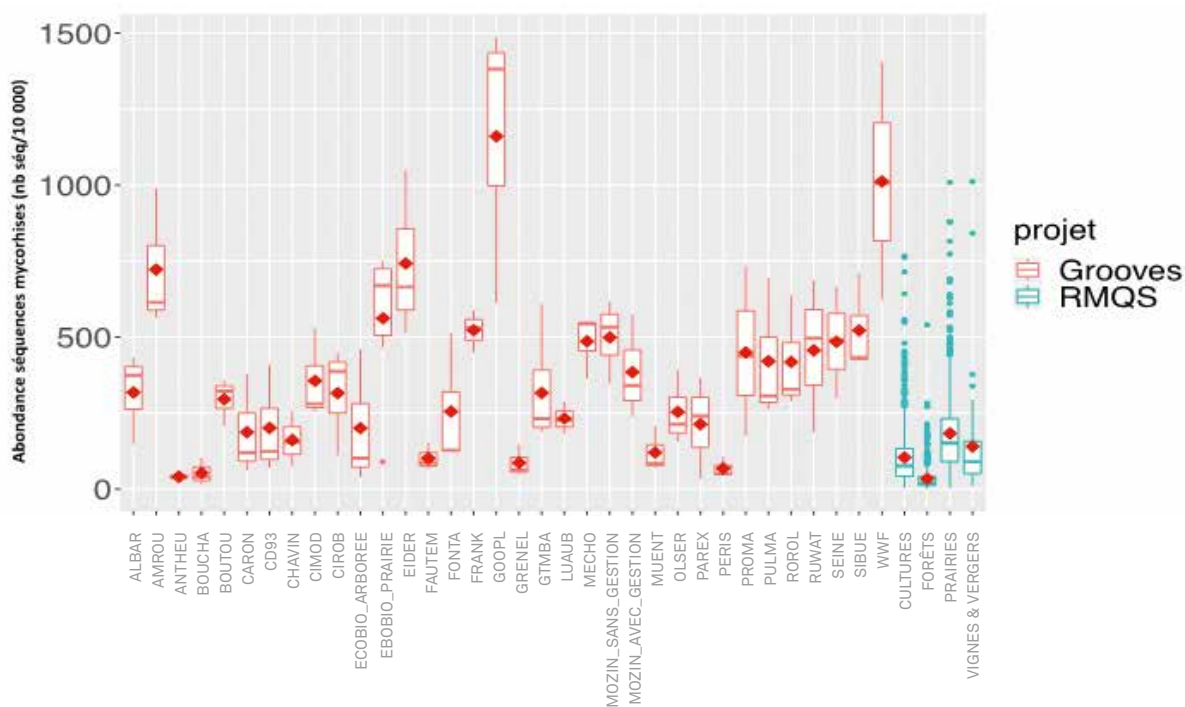


FIGURE 25 Abondance relative des séquences de champignons mycorrhiziens au sein de la communauté fongique totale dans les toitures végétalisées, mise en regard avec les valeurs obtenues dans les sols du RMQS regroupés selon leur usage culture/forêt/prairie/vigne&vergers. © INRAE Dijon

Si le niveau d'occurrence n'est pas impacté par le type de toiture ou de substrat, la structure de la communauté mycorhizienne est en revanche différente entre les sols de type intensif ou semi-intensif d'une part, et extensif d'autre part. De même, la structure de la communauté est discriminée entre la terre agricole, les substrats mixtes et les substrats minéraux. Ceci montre que si l'abondance relative de cette communauté est élevée dans toutes les toitures, les conditions offertes par les différents types de toiture ou de substrat sont plus ou moins favorables au développement des différentes populations qui composent la communauté.



« Pooling » des 10 échantillons de sol sur la toiture du bâtiment technique du Conseil départemental du 93. © Marc Barra | ARB idF

Les réseaux de co-occurrence microbiens

Au sein de la matrice sol, les micro-organismes ne vivent pas de façon isolée mais cohabitent en établissant des relations complexes qui déterminent leur fonctionnement individuel, mais aussi de façon globale le fonctionnement de la communauté. Ces interactions peuvent être bénéfiques (ex. commensalisme, mutualisme, symbiose) ou négatives (ex. prédation, parasitisme, compétition) en fonction de l'impact qu'elles engendrent pour les espèces impliquées [20].

Nous avons vu dans les sections précédentes que les sols de toitures végétalisées présentent des niveaux de biodiversité bactérienne et fongique élevés, souvent au-dessus des valeurs moyennes des sols du référentiel RMQS. En complément, nous avons réalisé une analyse des réseaux d'interaction microbiens dans ces toitures afin de déterminer, au-delà des niveaux de diversité, le niveau de complexité des interactions au sein de la communauté microbienne. Pour cela, nous avons déterminé les réseaux de co-occurrence microbiens. Ces réseaux présentent l'avantage de fournir une vision intégrant l'ensemble des relations entre les micro-organismes au sein du sol. Deux espèces peuvent interagir de façon multiple simultanément. La résultante de l'ensemble de ces interactions aboutit soit à l'évolution conjointe des organismes dans le milieu (relation positive appelée co-occurrence), soit à leur évolution opposée (relation négative appelée co-exclusion) ou à une absence de relation. À l'échelle des communautés, l'ensemble de ces relations positives ou négatives constitue un réseau de co-occurrence. La Figure 26 représente le nombre de liens du réseau microbien (bactéries et champignons) calculé en fonction du type de substrat. Les résultats obtenus sur l'ensemble des toitures analysées montrent que les réseaux sont moins complexes dans les substrats terreux en comparaison des substrats minéraux et mixtes. Cette tendance est confirmée par les résultats de l'analyse individuelle de deux toitures (Figure 27):

- ECOBIO-PRAIRIE (45 liens) : toiture de type intensif, substrat « terre agricole »
- GTMBA (61 liens) : toiture de type semi-intensif, substrat minéral

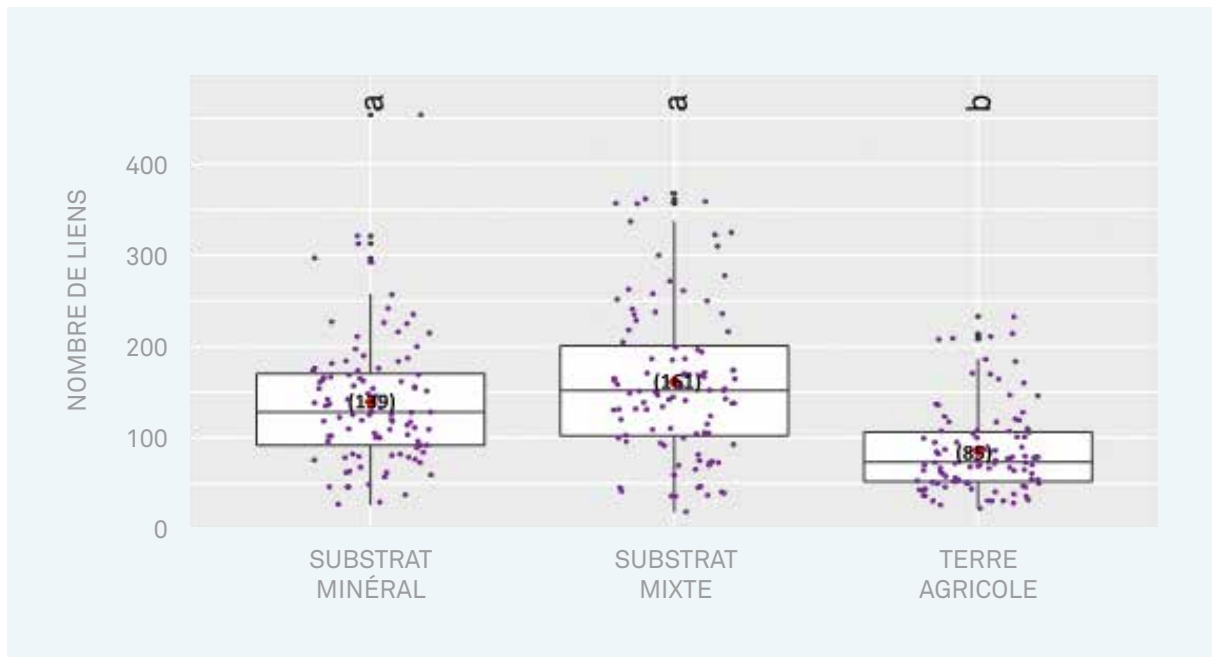


FIGURE 26 Complexité des réseaux de co-occurrence microbiens (bactéries/champignons) estimée au moyen du nombre de liens du réseau calculé sur l'ensemble des toitures végétalisées en fonction du type de substrat. Chaque point correspond à une toiture. Les valeurs entre parenthèses correspondent à la moyenne des valeurs pour chaque catégorie. © INRAE Dijon

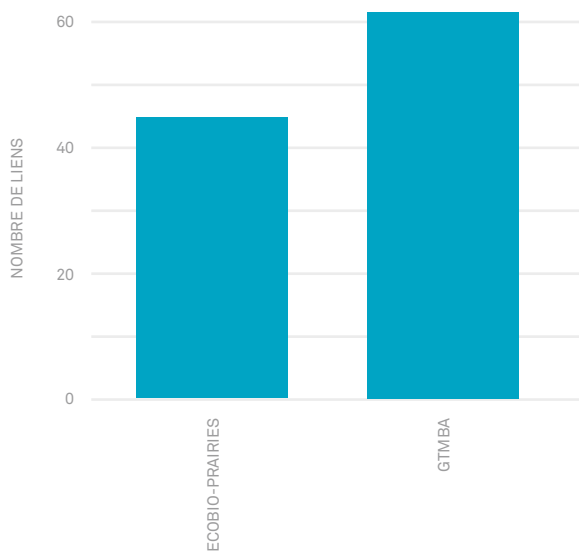


FIGURE 27 Complexité des réseaux de co-occurrence microbiens (bactéries/champignons) estimée au moyen du nombre de liens du réseau calculé sur deux toitures végétalisées : Ecobio-prairie et GTMBA. © INRAE Dijon

Des travaux complémentaires seraient nécessaires pour déterminer les paramètres expliquant cette simplification des réseaux dans les substrats terreux en comparaison des substrats plus construits.

Les résultats des analyses microbiologiques montrent que les toitures végétalisées représentent des environnements propices au développement des communautés microbiennes (bactéries et champignons), tant en termes quantitatifs (biomasse) que qualitatifs (diversité). Les niveaux moyens d'abondance et de diversité microbienne dans les toitures sont ainsi supérieurs à ceux rapportés à l'échelle nationale dans les sols « naturels » par le référentiel RMQS. Ce travail suggère aussi une écologie microbienne particulière de ces milieux liés d'une part, à la spécificité de ces matrices en termes de propriétés physicochimiques, mais aussi d'autre part, à l'exposition de ces environnements à de fortes fluctuations des conditions climatiques et aux pollutions atmosphériques. Au-delà des résultats obtenus à l'échelle des communautés bactériennes et fongique totales, la stimulation des communautés mycorhiziennes apparaît comme un résultat remarquable dont l'investigation devrait être poussée plus avant. De même, l'analyse des réseaux d'interactions microbiennes au sein de ces toitures fournit des pistes prometteuses de recherche. Ce travail illustre également que les toitures sont des environnements trop spécifiques pour que des outils de diagnostic développés à partir de référentiels construits sur les sols « naturels » puissent être appliqués. En d'autres termes, il montre la nécessité de se doter de référentiels propres à ces milieux particuliers pour pouvoir évaluer la qualité écologique.

LES ENDOMYCORHIZES DES TOITURES VÉGÉTALISÉES

Par Laurent Palka et Yves Bertheau,
Muséum national d'Histoire naturelle

Une mycorhize est le produit d'une coévolution entre un champignon microscopique et une racine. Il en existe cinq types différents dont les plus importants sont les ectomycorhizes et les endomycorhizes. Les ectomycorhizes constituent des structures externes qui entourent la racine tandis que les endomycorhizes se trouvent à l'intérieur des racines. Dans le cadre de GROOVES, Laurent Palka et Yves Bertheau, chercheurs au Muséum national d'Histoire naturelle, se sont intéressés aux endomycorhizes, qui sont les structures les plus fréquentes parmi les plantes puisqu'elles touchent 72 % des angiospermes, dont majoritairement les herbacées. Les endomycorhizes (groupe des Gloméromycètes) sont le siège d'intenses échanges : c'est une association symbiotique mutualiste dans laquelle le champignon apporte à la plante de l'eau et des nutriments. L'eau et les éléments minéraux montent dans les parties aériennes de la plante et favorisent la production de biomasse végétale, l'aidant ainsi à résister à divers stress abiotiques comme la sécheresse. En retour, le champignon obtient des molécules carbonées issues de la photosynthèse jusqu'à 20 % de ce que la plante produit.

Les toitures végétalisées sont caractérisées par de nombreux stress abiotiques affectant les plantes : espace restreint, faible épaisseur de substrat, lessivage de minéraux, peu de matière organique minéralisable, grande amplitude des variations de températures, excès et déficits en eau. Hormis certaines espèces xérophytiques aptes à coloniser de tels espaces, les espèces végétales doivent donc pouvoir résister à ces multiples facteurs. L'association avec des champignons mycorhizogènes est susceptible de les aider à y parvenir et donc de diversifier les espèces de ces écosystèmes. Une étude a par exemple montré que *Medicago truncatula*, la luzerne tronquée, soumise à une augmentation constante de la température nocturne de 1,5°C, produit significativement plus de fleurs, plus de graines ainsi qu'une plus grande biomasse de tiges et de racines en présence du champignon à arbuscule *Rhizophagus irregularis*, et limite l'effet de la hausse de la température de l'air et du sol. La bibliographie nous apprend qu'une grande diversité de Gloméromycètes augmente les chances des plantes de résister à plusieurs stress.

Ainsi, le maintien des herbacées d'un toit sera favorisée par une richesse spécifique élevée en

Gloméromycètes. L'objectif principal est donc de déterminer la richesse et la diversité spécifiques des Gloméromycètes des toits échantillonnés et d'en déduire une cartographie en région parisienne.

Dans le cadre de l'étude GROOVES, les taxons de Gloméromycètes sont identifiés par l'ADN extrait de racines, amplifié par PCR. Des séquences amplifiées communes aux eucaryotes sont testées par des amorces spécifiques des Gloméromycètes. Les séquences des fragments amplifiés sont ensuite comparées avec celles de Gloméromycètes. Un genre est identifié pour une similarité de séquence située entre 90 et de 95 %, une espèce pour une similarité d'au moins 97 %.

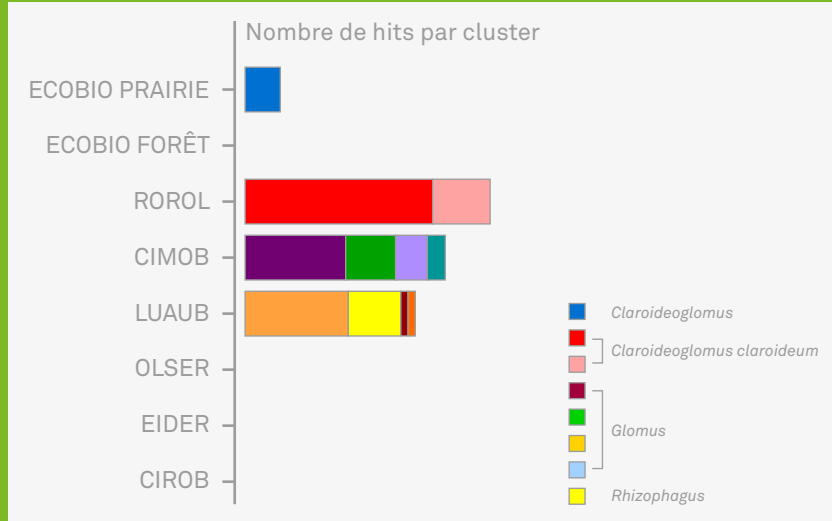
En 2017, les racines de 9 toits végétalisés (ECOBIO prairie, ECOBIO forêt, ROROL, FONTA, CIMOB, LUAUB, OLSER, EIDER et CIROB) ont été échantillonnées. Des Gloméromycètes ont été identifiés pour 8 toits, le toit FONTA restant négatif. Seuls 4 séquençages ont donné suffisamment de séquences assignables au genre *Claroideoglomus* (sur ECOBIO PRAIRIE et ROROL), *Glomus* (sur CIMOD) et *Rhizophagus* (sur LUAUB). L'assignation au niveau de l'espèce n'a été possible que pour ROROL qui est dominé par *C. claroideum*.

Les racines de deux toits (ECOBIO et ROROL) paraissent présenter une richesse et une diversité de taxons fongiques plus faible que sur les deux autres (CIMOB et LUAUB). Des différences semblent donc exister selon les toits : présence de *Rhizophagus* uniquement sur LUAUB, et de *Claroideoglomus* sur ECOBIO prairie et ROROL. Il convient maintenant de tenter de corrélérer ces différences avec des facteurs biotiques (espèces végétales présentes, taxons fongiques dans les pelouses environnantes, comparaison des taxons des racines et des substrats...) et abiotiques (origine des substrats, épaisseur et nature...). Ces résultats préliminaires nécessitent de reprendre le séquençage déjà fait pour : 1) affiner les résultats jusqu'à l'espèce ; 2) combler les manques en ADN amplifié. Il sera également intéressant de comparer les taxons de Gloméromycètes associés aux racines (résultats Palka - Bertheau) et ceux présents dans le substrat (résultats Ranjard - Maron) pour savoir si la présence dans le substrat implique obligatoirement ou non une association avec les racines.





FIGURE 28 La diversité des endomycorhizes retrouvées dans les plantes est très variable entre les sites. © Laurent Palka et Yves Bertheau - MNHN



Marc Barra et Laurent Palka prélèvent les racines pour l'analyse des endomycorhizes sur la toiture de l'école Rue Eider à Paris.
 © Maxime Zucca | ARB îdF





#6

CAPACITÉ DE RÉTENTION EN EAU DES TOITURES VÉGÉTALISÉES

Les techniques de gestion alternative des eaux pluviales sont de plus en plus plébiscitées par les collectivités face à la recrudescence du ruissellement en ville. Elles s'appuient avant tout sur la pleine terre et l'infiltration directe dans les sols, via la création de multiples espaces végétalisés et la réhabilitation de milieux humides et de cours d'eau.

Dans les secteurs urbains denses, les surfaces foncières disponibles sont de plus en plus réduites et le stockage des eaux pluviales sur le toit des bâtiments, en complément d'autres systèmes, peut s'avérer être une solution adaptée.

Afin de mieux comprendre quels sont les paramètres qui influencent la rétention d'eau sur les toitures végétalisées et évaluer le potentiel de stockage des toitures lors d'évènements pluvieux, plusieurs analyses ont été réalisées à partir de l'étude des substrats.

ÉVALUATION DE LA RÉTENTION EN EAU

PROTOCOLE



La Rétention Maximale en Eau (à Capacité Maximale en Eau ou CME) est obtenue en laboratoire 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. 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) [21]. 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

des gestionnaires, serait très dommageable pour les toitures de petite taille et de faible épaisseur. Ainsi, nous avons convenu avec Aurea qu'un volume minimum de 4 à 5 L suffirait pour 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. Le calcul de la rétention en eau de chaque toiture est obtenu par la mesure de la rétention en eau par unité de surface (L/m^2) ainsi que la rétention en eau totale ($L/toiture$).



L'épaisseur du substrat, comme sa composition, sa granulométrie et sa texture, ont une influence sur les capacités de rétention en eau des toitures végétalisées © Audrey Muratet | ARB idF

Plusieurs variables peuvent influencer sur la capacité de rétention en eau des toitures végétalisées. Certaines dépendent directement du substrat (sa profondeur, sa composition, sa granulométrie ou encore sa texture), tandis que d'autres facteurs, comme la biomasse végétale, peuvent également faire varier le potentiel de stockage de l'eau. Les résultats obtenus en laboratoire montrent que les substrats de type « agricoles » et « mixtes » peuvent stocker davantage d'eau que les substrats « minéraux », compte tenu de leur composition (pourcentage d'argile, teneur en matière organique, etc.) et de leur structuration (granulométrie, porosité, etc.). Pour un même volume de substrat, les toitures intensives retiennent plus d'eau que les toitures extensives, soit respectivement une CME de 49,5% contre 37% en moyenne. Ces différences s'expliquent car les toitures extensives ont une macroporosité plus importante qui accueille davantage d'air au détriment de l'eau. Cela est plus variable pour les substrats « mixtes » dont la composition est plus hétérogène.

La relation entre la profondeur de substrat et la capacité maximale de rétention en eau nous permet d'estimer le volume d'eau théorique que peuvent retenir les différentes toitures végétalisées. On remarque l'importance des variations entre la toiture la moins absorbante (CD 93 avec 6 L/m², substrat minéral, 3,5 cm d'épaisseur) et la plus absorbante (Ecobio_Bois avec 532 L/m², substrat agricole, 100 cm d'épaisseur). Pour une rétention en eau efficace, lors de la conception, la prise en compte de l'épaisseur de substrat est primordiale. Les valeurs calculées indiquent, dans la théorie, qu'il existerait un seuil à 25 cm au-delà duquel les toitures végétalisées voient leur capacité de rétention augmenter de façon importante. Cependant, ces valeurs sont théoriques et supposent que les toitures soient totalement sèches avant un épisode pluvieux. De plus, la périodicité de la pluie n'est pas prise en compte et le rôle de la végétation non évalué dans l'absorption. Ces calculs, purement mathématiques, sont donc sujets à une marge d'erreur notable.

Pour approfondir ces premiers résultats et intégrer les paramètres précédemment ignorés (type de végétation, pluviométrie), le modèle FAVEUR (outil Fonctionnel pour l'estimAtion de l'impact des toitures Végétalisées sur le ruissellement Urbain), développé par le Cerema a été appliqué [22]. Celui-ci permet d'estimer les capacités de rétention en eau des toitures en prenant en compte le climat biogéographique, la profondeur de substrat, la capacité maximale de rétention en eau et la végétation présente. Le modèle simule l'efficacité hydrique moyenne de chaque toiture en s'appuyant sur une chronique météorologique pluriannuelle collectée par le Cerema. Le modèle permet ainsi de prédire un abattement événementiel

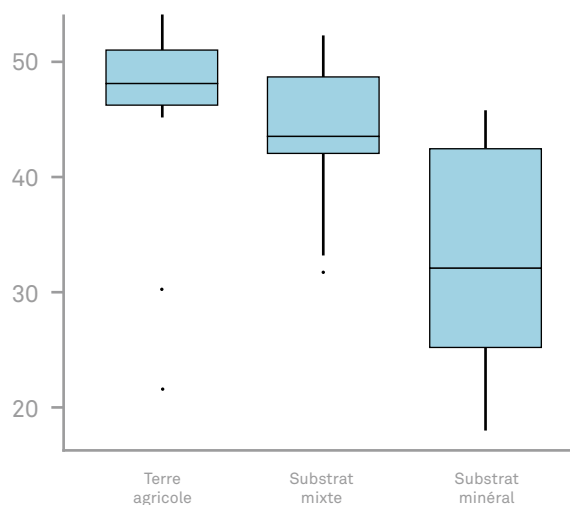


FIGURE 29 Capacité maximale de rétention en eau en fonction du type de substrat. © ARB idF

maximum par toiture, soit le volume d'eau retenu par l'ouvrage. Les résultats confirment la tendance observée précédemment avec des valeurs évoluant de 200 à 500 mm de lame d'eau retenue par an et par toiture (1 mm de pluie correspondant à 1L/m²). Ces valeurs peuvent être utiles pour anticiper le besoin de gérer les eaux pluviales à l'échelle d'une opération d'aménagement. En Île-de-France, l'Agence de l'Eau Seine Normandie considère que les aménagements végétalisés doivent assurer au moins la gestion des pluies « courantes », soit une lame d'eau de 8 mm en 24 h. Selon ses calculs, cela correspond à une profondeur de substrat de 8 cm, valeur à partir de laquelle elle accorde des subventions à la végétalisation, au titre de la gestion des eaux pluviales.

La mise en perspective de ces valeurs par rapport à une pluie décennale moyenne de 48 mm en 4h montre que seules 5 toitures sur 26 sont en mesure de réguler ce type d'évènement extrême. Ces dernières (CIROB, FRANK, ALBAR, OLSER et PULMA) ont des substrats agricoles et s'approchent de 30 cm de profondeur. L'outil FAVEUR laisse penser que pour une forte capacité de rétention d'eau, le seuil se situerait davantage autour de 30 cm et entre 10 et 30 cm pour une capacité de rétention moyenne.

Ces résultats pourraient être utiles 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.

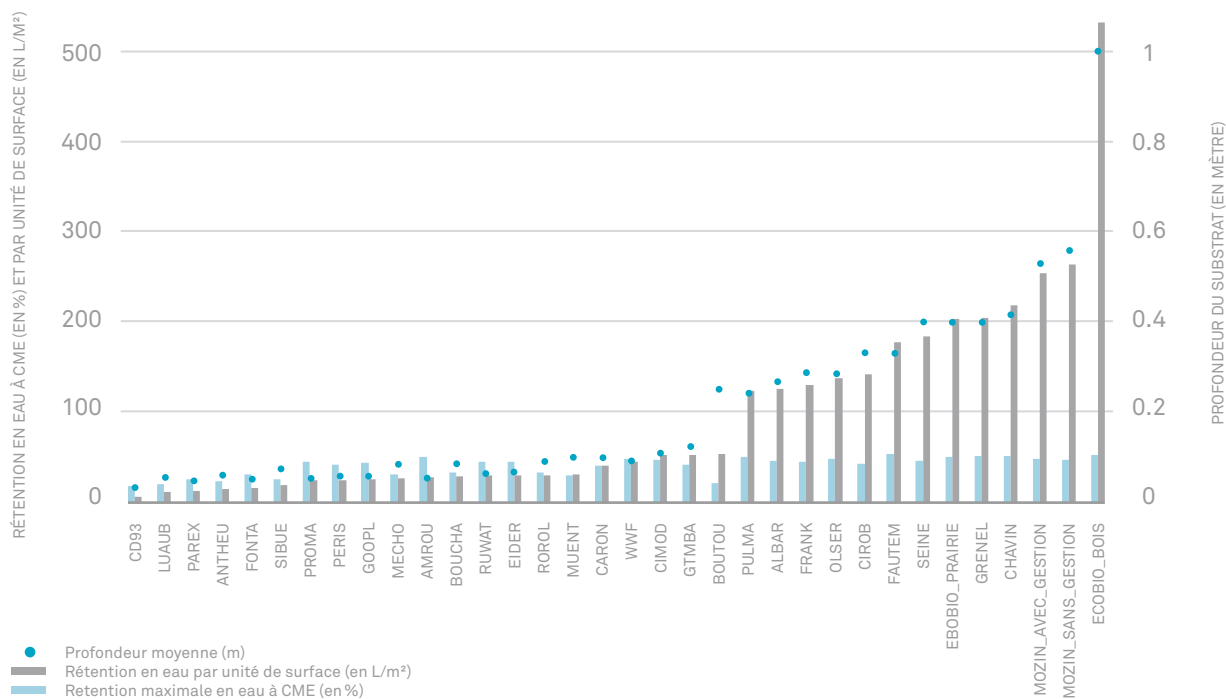


FIGURE 30 Evolution de la capacité de rétention en eau théorique en fonction de la profondeur du substrat. © ARB îdF

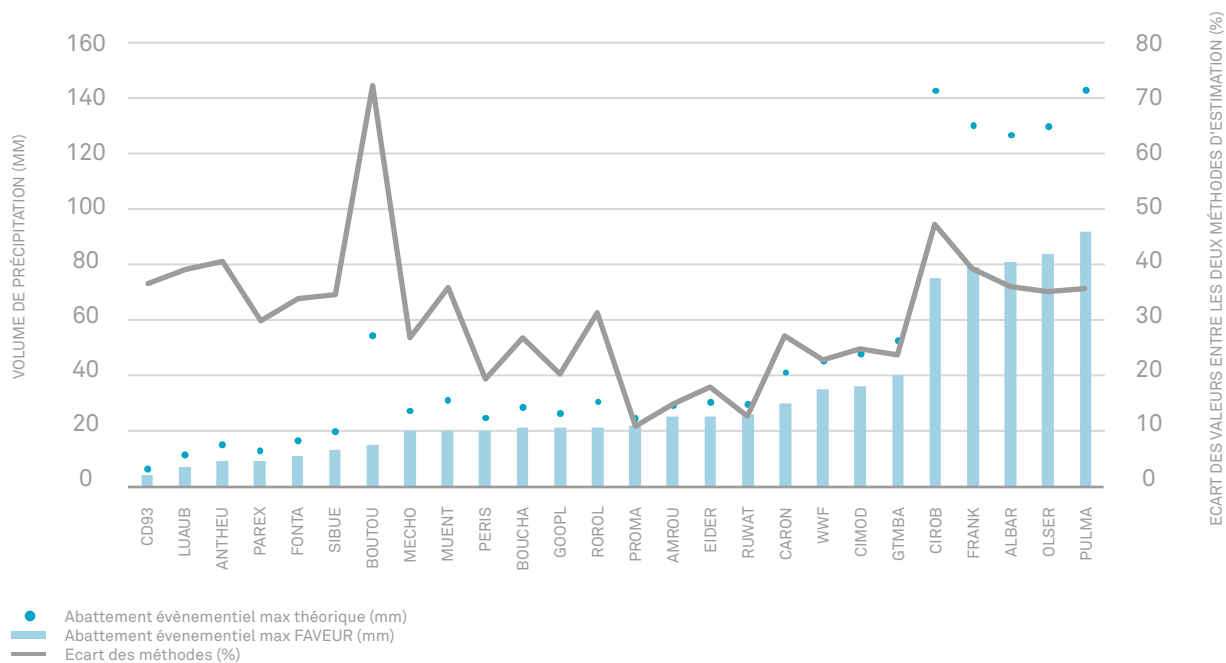


FIGURE 31 Comparaison du potentiel de rétention en eau théorique (calculé grâce aux paramètres physico-chimiques du substrat) et de la rétention selon le modèle FAVEUR (outil Fonctionnel pour l'estimation de l'impact des toitures Végétalisées sur le ruissellement Urbain), développé par le Cerema. © ARB îdF - Cerema



La toiture de l'école des Boutours à Rosny-sous-Bois © Audrey Muratet | ARB îdF



La toiture de la Seine musicale à Boulogne-Billancourt a une capacité de rétention en eau d'environ 184 L/m² © Audrey Muratet | ARB îdF



Il arrive que l'on tombe nez-à-nez avec un ver de terre!
Toiture du Cinéma Robespierre à Ivry-sur-Seine
©Marc Barria | ARB idF

#7

EFFET DE RAFRAÎCHISSEMENT PAR LES TOITURES VÉGÉTALISÉES

La température au sein des villes est généralement plus élevée que les zones semi-urbaines ou non urbaines qui les entourent : on parle d'effet d'îlot de chaleur urbain. En Île-de-France, de forts contrastes territoriaux ont été observés entre la petite couronne et la campagne, en particulier l'été et la nuit (jusqu'à 8 à 10°C d'écart pour les minimums de température lors d'un épisode extrême de canicule à Paris). Plusieurs études confirment le rôle de la végétalisation des villes dans l'atténuation de la chaleur urbaine. Dans le cadre de sa thèse sur les toitures végétalisées, Yann Dusza rapporte les résultats de plusieurs travaux de recherche qui montrent un potentiel réel de rafraîchissement induit par les toits verts [12].

Toutefois, l'effet qu'aurait une végétalisation partielle des villes sur l'îlot de chaleur urbain est plus délicat à estimer. Bass et al. (2002) ont modélisé les effets qu'aurait la végétalisation de 50% des toits de Toronto grâce à des systèmes extensifs de type Sedum et ont obtenu une réduction globale de 1°C. L'irrigation de ces toits permettrait d'atteindre 2°C de réduction. Smith et Roebber (2011) ont modélisé l'impact qu'aurait la végétalisation de l'ensemble des toits de la ville de Chicago et ont estimé qu'une réduction de 2 à 3°C de la température ambiante de la ville était envisageable en période chaude. Dans le cadre de l'étude GROOVES, David Ramier, chargé d'étude au Cerema, a réalisé des mesures *in situ* du potentiel de rafraîchissement de quelques toitures végétalisées sélectionnées selon leur typologie.

ÉVALUATION DU POTENTIEL D'ÉVAPOTRANSPIRATION

Afin de tester l'hypothèse d'un rafraîchissement généré par les toitures végétalisées, des mesures de l'évapotranspiration des végétaux ont été effectuées par le Cerema (David Ramier, Walha Riahi, Rémi Val, Jean-François Durmont, et Emmanuel Berthier) sur 13 toitures végétalisées de l'échantillon, en juin et en octobre 2018. Une chambre à évapotranspiration a été utilisée pour effectuer les mesures. Le principe consiste à évaluer la variation d'humidité à l'intérieur d'une enceinte fermée afin d'en déduire le flux d'évapotranspiration. La chambre à évapotranspiration est constituée d'une enceinte en plexiglas d'une surface de 1 m² et d'une hauteur de 30 cm. Une embase métallique permet d'assurer l'étanchéité avec le sol. A l'intérieur de la chambre, l'humidité est mesurée avec un analyseur de gaz. Des mesures de température et de rayonnement net sont également réalisées à l'intérieur de l'enceinte dans le but de vérifier les éventuelles modifications de ces paramètres lors de la pose de l'enceinte.

Le temps de pose de la chambre est de 2 minutes et seule la première minute de mesure est utilisée pour le calcul de l'évapotranspiration.

Pour le projet GROOVES, des mesures ont été réalisées, toutes les heures au cours d'une journée, sur 13 toitures en 2018 et 13 toitures en 2019. Ces toitures ont été choisies en fonction de leur accessibilité, de leur substrat (de 3 à 56 cm) et du type de végétation (graminées, sédums ou mélanges graminées-sédums). En 2018, les mesures d'évapotranspiration ont eu lieu à deux saisons différentes, en été (juin et juillet) et à l'automne (octobre). Trois des toitures suivies en 2018 ont aussi fait l'objet de mesures en 2019 (FAUTEM, BOUTOU et ECOBIO). En 2019, les mesures se sont déroulées uniquement l'été entre juin et juillet.

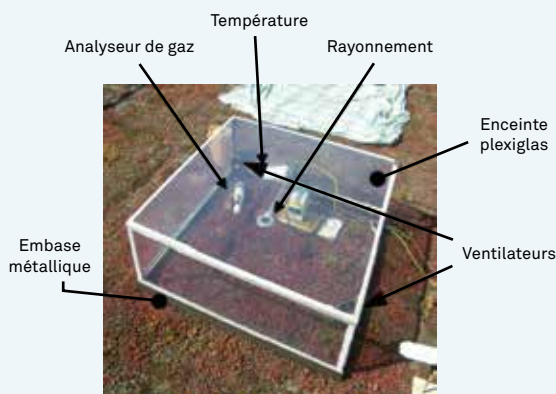


FIGURE 32 Photographie de la chambre à évapotranspiration du Cerema et de ses composants. © Cerema

Pour chaque toiture, il a été choisi deux à trois emplacements différents afin d'observer la variabilité du flux d'évapotranspiration en fonction des différences de végétation qui peuvent être rencontrées sur chacune des toitures. Lors du processus d'évapotranspiration, la consommation d'énergie pour transformer l'eau liquide en vapeur permet de limiter l'augmentation des températures de surface, d'augmenter l'humidité de l'air mais aussi d'abaisser la température de l'air environnant ce qui permet alors de rafraîchir localement l'atmosphère. La présence de végétation sur les toits favorise l'évapotranspiration et peut donc participer au rafraîchissement urbain. Des suivis expérimentaux ont par exemple montré que les toitures végétalisées permettent d'évapotranspirer entre 50 et 70 % de la pluie annuelle. L'évapotranspiration étant très variable selon le complexe de végétalisation et au cours d'une journée, des mesures sont encore nécessaires. Le projet GROOVES a ainsi permis la réalisation de mesures sur un ensemble varié de toitures végétalisées.

L'évapotranspiration va dépendre de l'énergie reçue à la surface, de la capacité de l'air à accueillir de l'humidité (différence entre la quantité de vapeur d'eau dans l'air et la quantité de vapeur d'eau à saturation dans des conditions de température et de pression équivalentes) et de la vitesse du vent comme vecteur de transport de cette humidité. Cependant ces conditions climatiques vont définir la quantité d'eau potentiellement évapotranspirable. L'évapotranspiration réelle va en revanche être limitée par la disponibilité en eau du substrat et la capacité du sol et des plantes à transférer cette eau vers l'atmosphère du fait de résistances aérodynamiques et stomatiques. Ces dernières étant liées au développement de la végétation : superficie des feuilles, stade de la croissance, etc.

La quantité d'eau évapotranspirée peut être exprimé comme flux d'énergie (LE, en W/m²) ou comme un flux hydrique (E, en mm/h, par exemple, avec 1 mm/h ≈ 680,5 W/m²)

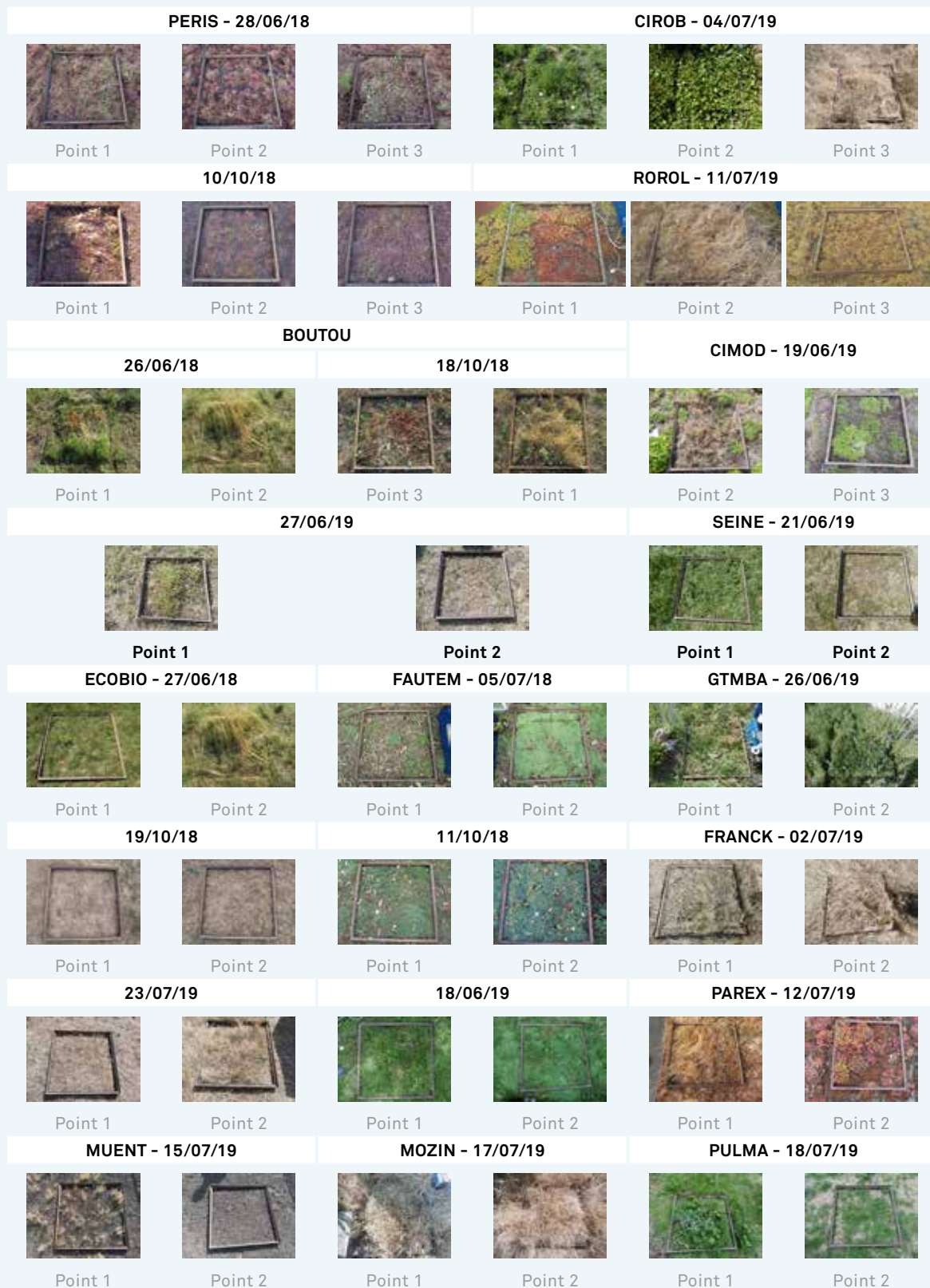


FIGURE 33 Photographies des différents points de mesure de l'évapotranspiration © Cerema

Les photos des différents points de mesure de la Figure 33 montrent les variabilités spatiales et temporelles des états de surface qui peuvent être observés, y compris pour une même toiture végétalisée. La Figure 34 présente la pluviométrie avant et pendant les mesures. La période la plus pluvieuse est celle précédant les mesures de juin-juillet 2018. Le cumul de pluie, 30 jours avant la première mesure, est de 168 mm avec un cumul de 78 mm, le 11 juin soit 15 jours avant cette première mesure. Puis, la période de mesure suivante est assez sèche, aucune pluie n'ayant eu lieu la semaine précédant les mesures (il est à noter que lors des mesures à FAUTEM, le 05/07/18, 0,4 mm de pluie ont été enregistrés).

Lors des mesures d'octobre 2018, la pluviométrie cumulée a été faible avec 12,7 mm, le mois précédant la mesure à PERIS, le 10 octobre 2019. La dernière pluie ayant eu lieu 3 jours avant la mesure. Il est ensuite tombé 2,2 mm, la nuit suivant la mesure à FAUTEM, puis aucune pluie la semaine précédant les mesures à BOUTOU et ECOBIO.

Pour les mesures réalisées en 2019, 45 mm ont été enregistrés 30 jours avant les premières mesures, le 18 juin 2019. Il est ensuite tombé 6 mm les deux jours suivants, puis aucune précipitation n'a été enregistrée jusqu'au 18 juillet. Ainsi hormis pour SEINE, où il a plu la veille, l'ensemble des mesures ont été réalisées après plusieurs jours sans pluie, entre 3 et 27 jours. Il apparaît donc que la plupart des mesures d'évapotranspiration réalisées se sont faites dans des conditions hydriques assez défavorables pour l'évapotranspiration. Les conditions climatiques globales de la région parisienne sont présentées en Figure 35.

Si les conditions microclimatiques des toitures peuvent être localement différentes des valeurs présentées (ombrage possible en particulier pour FAUTEM et PERIS, passages nuageux localisés, circulation du vent modifiée en fonction de l'urbanisation), il apparaît que les mesures réalisées sont faites généralement lors de journées chaudes, sèches et ensoleillées. Les températures maximales au cours des mesures sont généralement supérieures à 25°C et quelquefois, comme en 2019, supérieures à 30 voire 35°C. L'humidité relative de l'air minimum est généralement inférieure à 50 % et même 40 % certains jours. Le rayonnement global est généralement supérieur à 800 W/m² au maximum et la forme des cycles journaliers, très peu bruitée, indique l'absence de nuages, à quelques exceptions près. Le 5 juillet 2018 lors des mesures à FAUTEM, des nuages étaient présents (de la pluie a été enregistrée ce jour-là), ce qui se traduit également par un rayonnement moins important, des températures plus faibles et une humidité relative plus importante. En 2019, des passages nuageux sont également observés lors des mesures à FAUTEM, CIMOD et PAREX, ce qui correspond aux observations faites localement lors des mesures.

Lors des mesures à l'automne 2018, les conditions d'ensoleillement sont similaires mais avec des rayonnements plus faibles, autour de 500 W/m², et des conditions d'humidité et de température légèrement différentes entre les mesures de mi-octobre et celles de fin octobre.

Ainsi, si les conditions hydriques étaient défavorables, les conditions climatiques étaient en revanche plutôt favorables à l'évapotranspiration.



Les conditions climatiques et hydriques influencent la capacité de rafraîchissement des toitures végétalisées.
Bâtiment logistique dit « Mozinor » à Montreuil © Audrey Muratet | ARB îdF

**EFFET DE RAFFRAÎCHISSEMENT
PAR LES TOITURES VÉGÉTALISÉES**

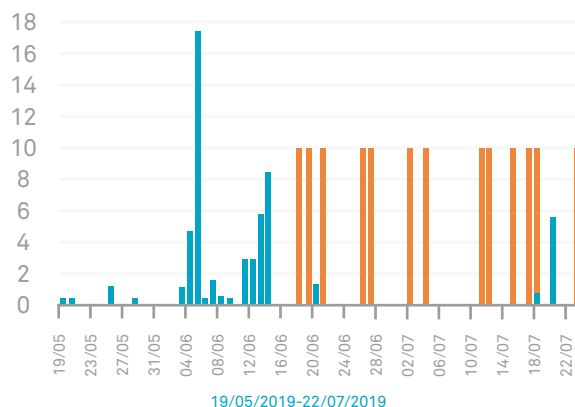
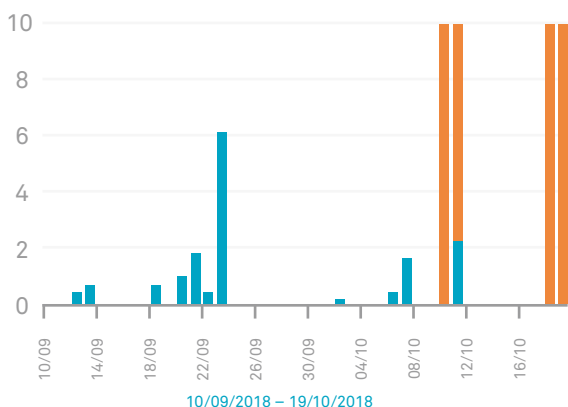


FIGURE 34 A, B ET C Pluviométrie journalière le mois précédent et au cours des différentes périodes de mesures (en bleu, sources infoclimat.fr, station de Paris-Montsouris). Les barres oranges représentent les jours pour lesquels des mesures d'évapotranspiration ont été réalisées. © Cerema

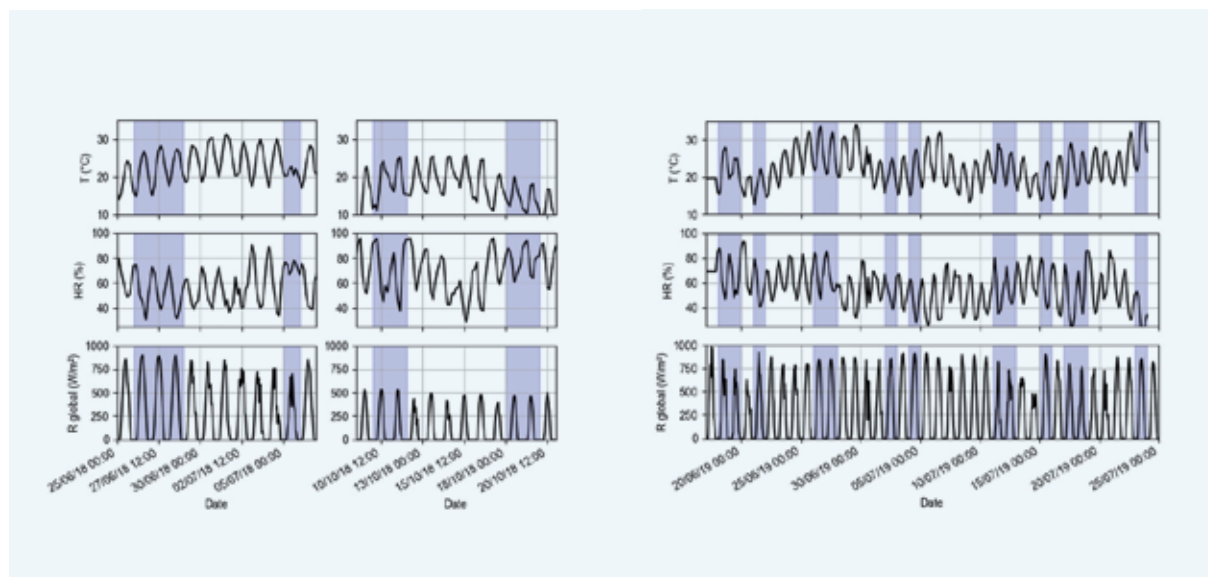
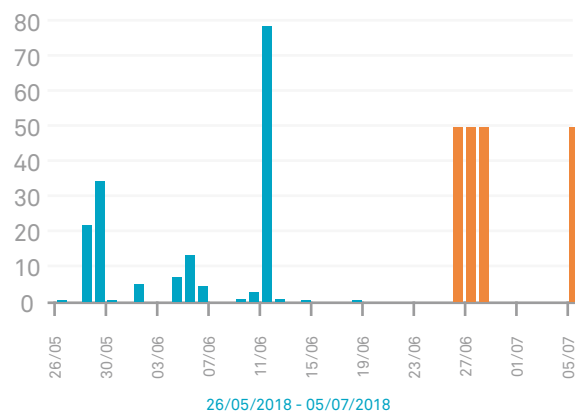


FIGURE 35 A ET B Température (T), humidité relative de l'air (HR) et rayonnement global (R global) au cours des mesures d'évapotranspiration en 2018 et 2019 (les zones bleutées indiquent les jours de mesure). Sources Météo-France, station d'Orly pour la température et l'humidité et Roissy pour le rayonnement global. © Cerema

Valeurs et variabilité du flux d'évapotranspiration

La Figure 36 montre la valeur maximale de l'évapotranspiration obtenue pour chaque toiture lors des cycles journaliers de mesure.

Les mesures réalisées sur les différentes toitures présentent une variabilité importante. Les maximums mesurés au cours des cycles journaliers varient entre 0,01 mm/h à MUENT (environ 7 W/m²) au mois de juillet 2019 et 0,28 mm/h (190 W/m²) obtenu à ECOBIO en juin 2018. À l'automne 2018, l'évapotranspiration maximale journalière la plus faible était de 0,02 mm/h à PERIS (14 W/m²), soit légèrement supérieure à celle obtenue à MUENT en juillet 2019.

Pour seulement 6 toitures sur les 14 étudiées (BOUTOU, ECOBIO, FAUTEM, PULMA, SEINE et CIROB) des valeurs d'évapotranspiration maximales supérieures à 0,15 mm/h (soit environ 100 W/m²) ont été mesurées. Toutes ces toitures sont classées comme toitures semi-intensives ou intensives, ce qui semble confirmer l'importance de l'épaisseur du substrat et du type de végétation.



Les orpins profitent de la moindre anfractuosité sur la paroi de l'école des sciences et de la biodiversité à Boulogne-Billancourt.
© Audrey Muratet | ARB idF

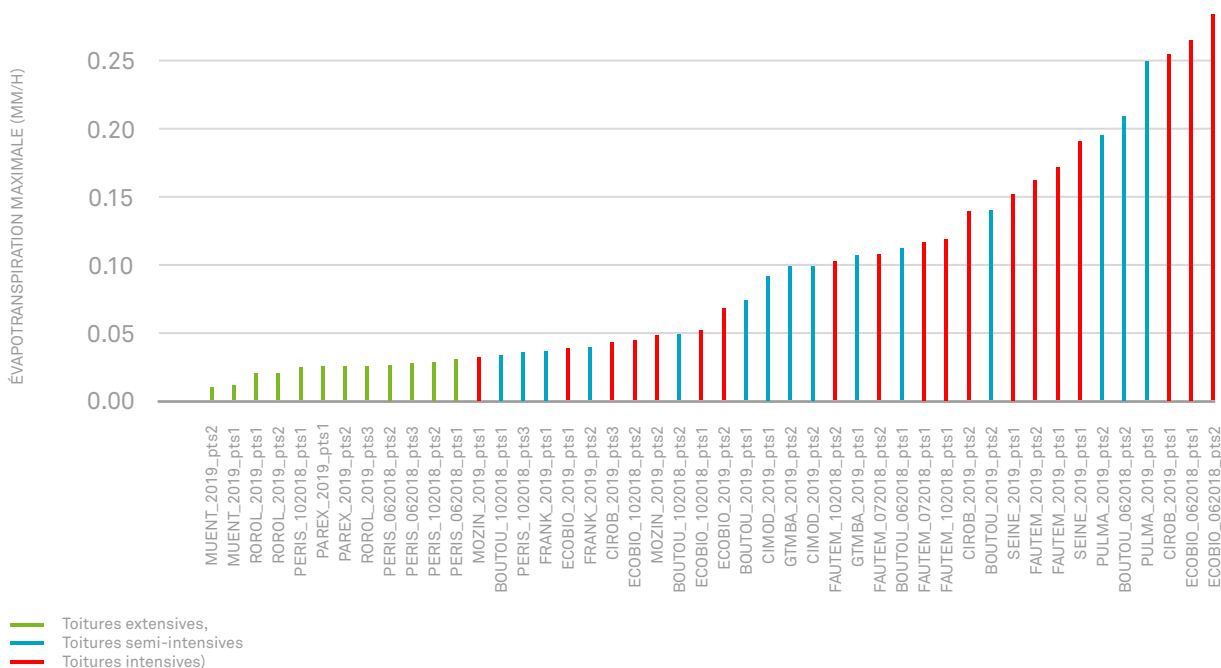


FIGURE 36 Évapotranspirations maximales obtenues sur chacune des toitures © Cerema

Effet de la végétation

Cependant, même pour ces toitures semi-intensives ou intensives, l'évapotranspiration va dépendre de l'état et de la nature de la végétation. La Figure 37 montre que pour CIROB, l'évapotranspiration peut-être 6 fois plus importante avec une végétation plus développée.

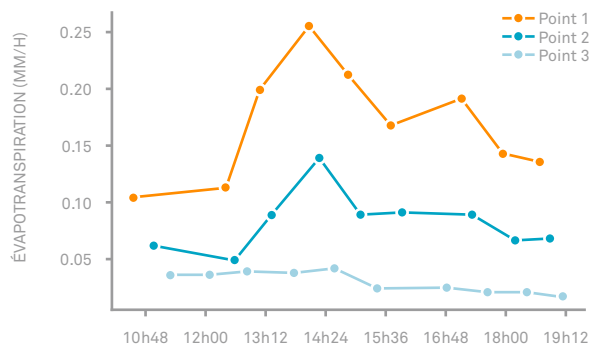


FIGURE 37 Cycle journalier d'évapotranspiration mesurée en trois endroits différents de la toiture CIROB, le 4 juillet 2019 © Cerema

Ainsi, l'état de la végétation des toitures FRANK et MOZIN au moment des mesures, explique sans doute que pour celles-ci, bien que classées comme toitures semi-intensives et intensives, l'évapotranspiration mesurée fût faible (inférieure à 0,06 mm/h).

Effet de la disponibilité en eau

L'état de la végétation est fortement dépendant des conditions hydriques et il apparaît que FRANK et MOZIN ont subi une longue période sèche avant les mesures. Ainsi, même pour des substrats épais (jusqu'à 50 cm pour Mozin), sans eau et avec une végétation en stress hydrique, l'évapotranspiration sera très faible et du même ordre de grandeur que des toitures extensives.

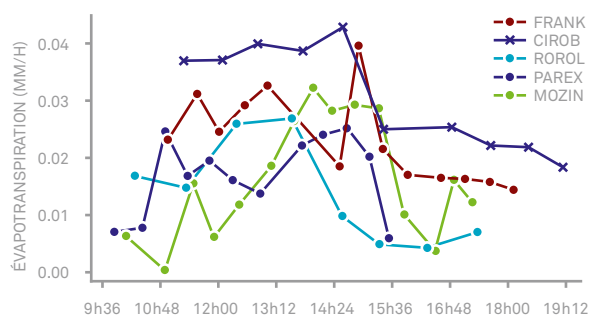


FIGURE 38 Cycle journalier d'évapotranspiration mesurée sur différentes toitures végétalisées après 12 à 27 jours sans pluie (FRANK – point 2, le 2 juillet 2019; CIROB – point 3, le 4 juillet 2019; ROROL – point 2, le 11 juillet 2019; PAREX – point 1, le 12 juillet 2019, MOZIN – point 1, le 17 juillet 2019). © Cerema

Le manque d'eau peut donc avoir un effet à long terme. Ainsi pour ECOBIO, en 2018, la pluviométrie cumulée le mois précédant la mesure est de 168 mm (dont 78 mm, le 11 juin 2018 soit 16 jours avant la mesure) puis il n'y a eu aucune pluie les 8 jours précédant la mesure. Cependant, l'évapotranspiration maximale mesurée est assez importante (autour de 0,28 mm/h, valeur la plus forte enregistrée sur l'ensemble des toitures).

A contrario, pour la même toiture en 2019, la période précédant les mesures a été plus sèche puisqu'il n'y a eu que 6 mm de pluie les 30 jours précédents. Bien que ces 6 mm soient tombés juste dans les 5 jours précédant la mesure, l'évapotranspiration mesurée est alors 4 fois plus faible que celle de juin 2018. Les valeurs d'évapotranspiration mesurées en juillet 2019 sont alors assez proches de celles obtenues en octobre 2018.

La différence de l'état de la végétation (Tableau 1) entre juin 2018 et juillet 2019 montre bien l'effet du manque d'eau sur celle-ci.

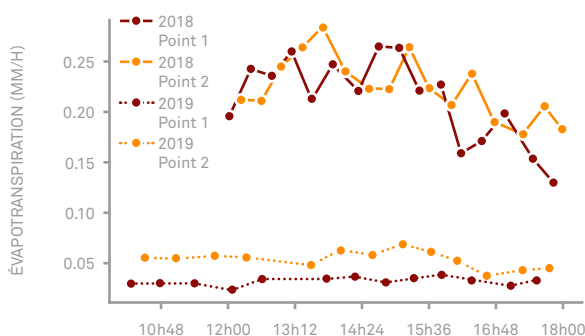


FIGURE 39 Cycle journalier d'évapotranspiration aux deux emplacements d'ECOBIO en 2018 (le 27 juin, trait plein) et 2019 (le 23 juillet, trait pointillé). © Cerema



Maxime Zucca peut profiter de la vue plongeante qu'offre la médiathèque Romain Roland à Romainville. © Gilles Lecuir | ARB idF

Effet potentiel sur le rafraîchissement urbain

La présence de végétation peut avoir un effet sur le rafraîchissement du fait de l'utilisation de l'énergie disponible à la surface qui limite ainsi l'augmentation des températures à la surface et le transfert de chaleur vers l'atmosphère. L'énergie disponible à la surface est estimée par le rayonnement net (Rnet, qui est le bilan des rayonnements solaires et infrarouges incidents et réfléchis par la surface). Ainsi est-il supposé que plus la part du rayonnement net utilisée pour l'évapotranspiration est grande et plus le rafraîchissement local au niveau de la toiture pourra être important. La Figure 40 présente la moyenne des rapports entre le flux d'évapotranspiration et ce rayonnement net pour chaque point de mesure pour chaque toiture.

Les six toitures (BOUTOU, ECOBIO, FAUTEM, PULMA, SEINE et CIROB) qui présentent les plus forts niveaux d'évapotranspiration sont donc aussi celles qui « utilisent » la plus grande partie du rayonnement net (entre 20 et 47%). Suivant les caractéristiques des toitures, ce rapport est très variable, y compris pour une même toiture. Ainsi, pour FAUTEM, alors que l'évapotranspiration maximale est obtenue lors des mesures de juillet 2018, le rayonnement net utilisé représente un peu moins de 25%. Or, lors des mesures du 11 octobre 2018, pour lesquelles l'évapotranspiration était plus faible, en moyenne 47% du rayonnement net était utilisé. Ceci peut s'expliquer par des conditions climatiques assez favorables ce jour-là : journée ensoleillée, température de l'air supérieure à 25°C, et humidité relative très faibles pour la saison, avec un minimum à 40%. Ces conditions climatiques semblent plus favorables

que celles de la journée du 18 juin 2019, autre jour de mesure à FAUTEM. Ces conditions climatiques du mois d'octobre 2018 sont similaires à PERIS, le 10 octobre 2018 pour laquelle le rapport LE/Rnet est également plus important ce jour-là que pour les mesures de juin 2018 sur la même toiture. Cependant, les caractéristiques de la toiture (sédums, 6cm de substrat), font que l'utilisation de l'énergie disponible pour l'évapotranspiration est moindre et donc l'effet sur le rafraîchissement peut l'être aussi.

Ces mesures confirment que les toitures végétalisées peuvent contribuer au rafraîchissement de l'atmosphère via le processus de l'évapotranspiration comme cela a d'ailleurs été démontré dans d'autres études. Cependant ce phénomène étant très variable, ces quelques mesures ponctuelles permettent d'obtenir des tendances liées aux caractéristiques des toitures étudiées mais ne permettent de quantifier complètement leur apport.

Il est toutefois observé qu'un choix idoine du substrat et de la végétation permet d'obtenir des toitures végétalisées plus favorables à l'évapotranspiration.

Cependant, l'évapotranspiration est, pour ces surfaces, rapidement limitée par la disponibilité en eau (même pour des toitures intensives). Leur efficacité pourrait donc être limitée dans le cas de période de canicule avec une pluviométrie très faible. À l'échelle de la ville, la contribution au rafraîchissement urbain par la végétation en toiture doit se faire en complément d'autres pratiques et l'ensemble des surfaces disponibles (toits, façades, sols, etc.) doit être utilisé. Cela nécessite également une disponibilité suffisante de l'eau dans les sols ou les substrats.

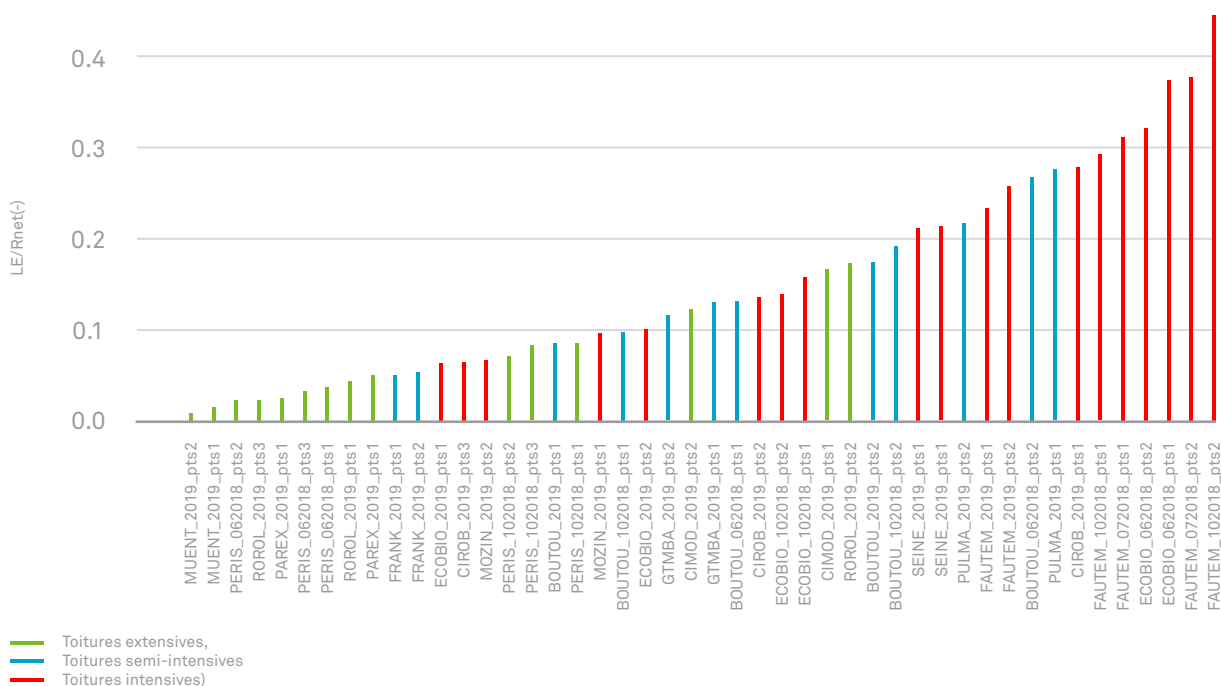
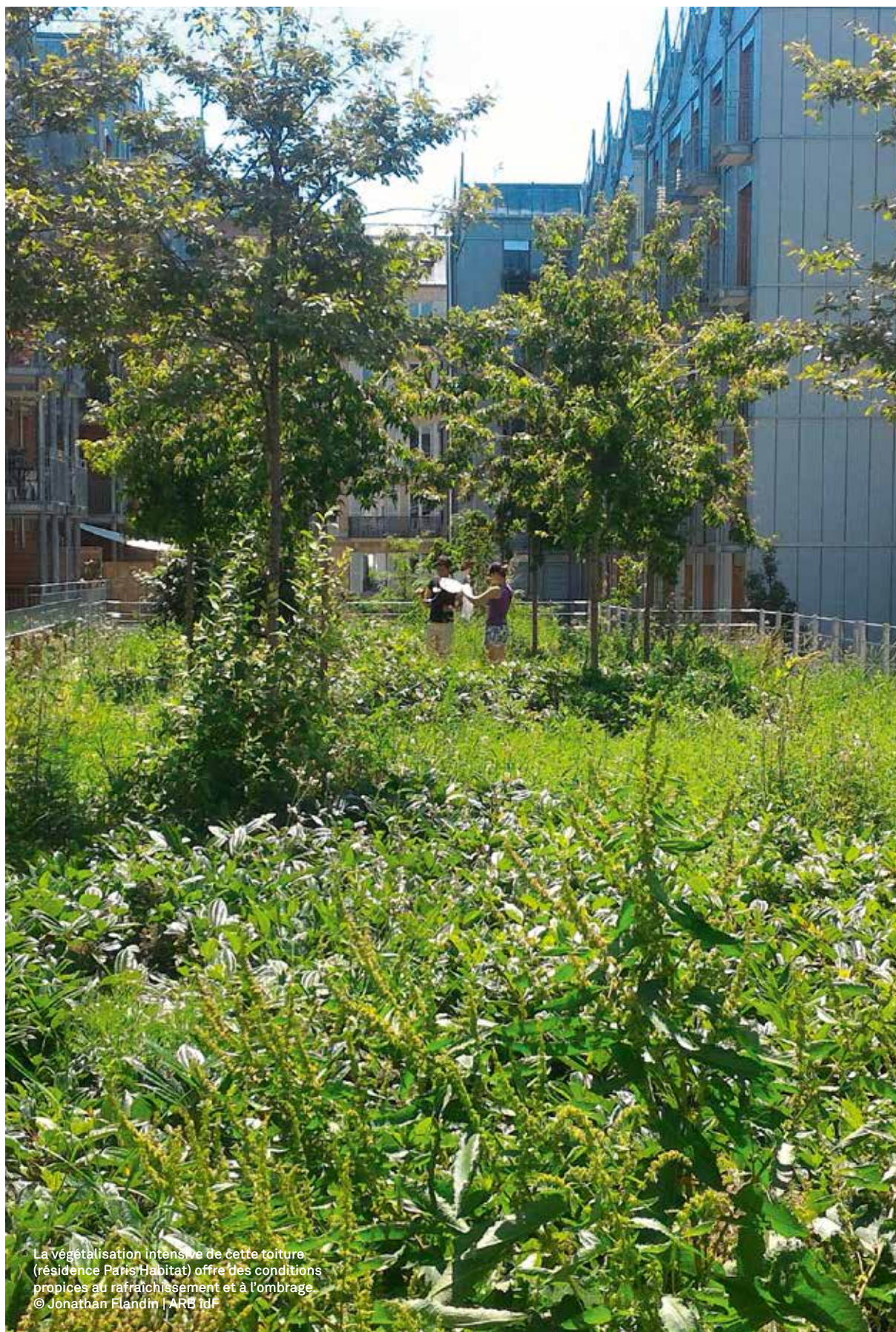
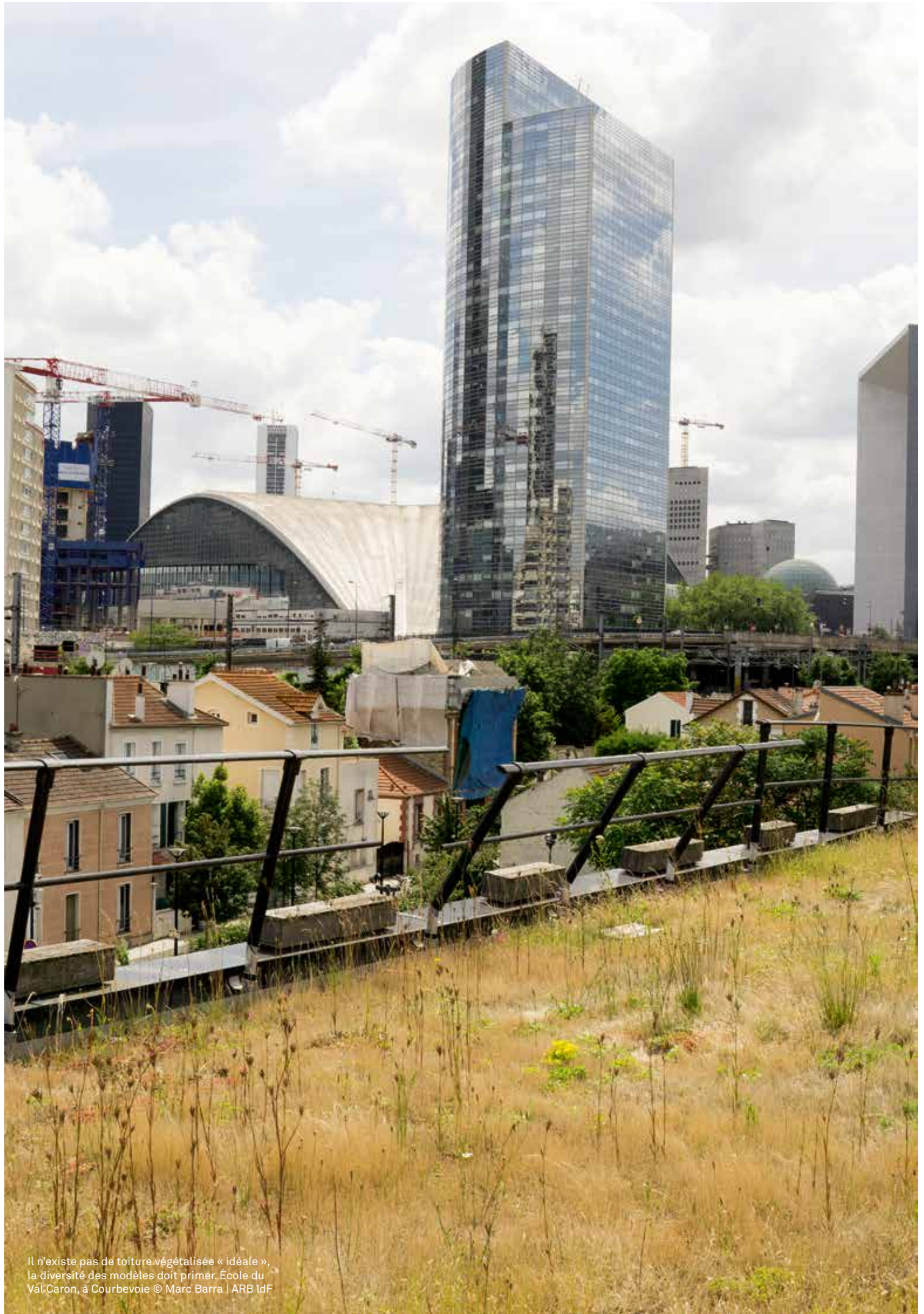


FIGURE 40 Rapport moyen entre le flux d'évapotranspiration (LE) et le rayonnement net (Rnet) pour chaque point de mesure de chaque toiture (le ratio entre LE et Rnet est calculé pour chaque heure de mesure, puis une moyenne de ce ratio a été réalisée pour chaque point de mesure de chaque toiture). En vert les toitures extensives, en bleu les semi-intensives et en rouge les intensives. © Cerema



La végétalisation intensive de cette toiture (résidence Paris Habitat) offre des conditions propices au rafraîchissement et à l'ombrage.
© Jonathan Flandin | ARB idF



Il n'existe pas de toiture végétalisée « idéale », la diversité des modèles doit primer. École du Val-Caron, à Courbevoie © Marc Barra | ARB IdF

#8

FAIRE ÉVOLUER LA CONCEPTION ET LA GESTION

Si les modes de conception des toitures végétalisées sont très variés selon les pays, des solutions industrielles se sont rapidement répandues à travers le monde. Les toitures à orpins, dites toitures « sedum », fabriquées selon un procédé standardisé (caissettes ou tapis précultivés) sont aujourd’hui majoritaires par rapport aux autres modes de conception.

Qu’il s’agisse du mode de conditionnement des végétaux ou des composants artificiels qui accompagnent les toitures, il est intéressant de s’interroger sur l’empreinte écologique de ces systèmes dont la multiplication peut avoir des impacts indirects sur l’environnement.

LES ENSEIGNEMENTS DE L'ÉTUDE GROOVES

Avec Grooves, l'ARB îdF et ses partenaires scientifiques ont souhaité mieux comprendre le fonctionnement des toitures végétalisées afin de conseiller les concepteurs et les gestionnaires. Au regard de l'étendue des analyses possibles, ces premières conclusions n'offrent qu'une ouverture sur le sujet.

En raison de leurs hauteurs, de leurs surfaces limitées, ou des conditions urbaines limitantes (pollution, chaleur, etc.), les toitures pourraient paraître comme des milieux inhospitaliers pour le vivant. Grooves montre toutefois que les espèces font preuve d'une étonnante capacité d'adaptation et de colonisation sur ces nouveaux écosystèmes urbains qui peuvent servir d'habitats de substitution ou de refuge complémentaires aux autres espaces verts urbains.

RECOMMANDATIONS POUR UNE MEILLEURE CONCEPTION

Les résultats montrent, comme souvent en écologie, qu'il n'y a pas de « recette idéale », mais que les recommandations varient en fonction du groupe d'espèces considéré, du critère analysé, de la situation géographique, etc. Concernant la profondeur de substrat, on remarque que la richesse floristique atteint un seuil autour de 30 cm d'épaisseur alors que la diversité en pollinisateurs continue à augmenter au-delà de ce seuil. En privilégiant un substrat de type « mixte » ou « agricole » avec un minimum de 10 % d'argile, 60 % de sable et d'environ 30 cm de profondeur, celui-ci sera plus à même de fournir un support suffisant à l'installation d'une diversité spécifique variée et permettra une meilleure rétention des eaux de pluie.

Si l'on s'intéresse aux mousses et aux lichens, il s'avère que les toitures « sédums » sont plus riches que les autres toitures. L'inverse s'observe pour la richesse floristique, plus importante sur les toitures semi-intensives et intensives que sur les toitures extensives en sedums. Cependant, comme nous l'indiquions,



Le mode de conditionnement des végétaux n'échappe pas lui non plus à des logiques industrielles tendant à standardiser des produits pour les besoins de leur commercialisation © Marc Barra | ARB îdF

la biodiversité ne peut se réduire à la richesse en espèces : les compositions particulières, des assemblages, les niveaux de rareté, comptent tout autant pour définir un milieu favorable. Souvent critiquées pour leur faible nombre d'espèces, les toitures « sedums » présentent une composition particulière (espèces de milieux secs ou/et voyageuses), qui en font des habitats originaux. Pour autant, certaines d'entre elles restent néanmoins trop artificielles dans leur composition du fait de leur conception en systèmes précultivés tendant à l'uniformisation. Ces réflexions nous amènent à comprendre par ailleurs, à l'échelle d'un quartier, d'une ville ou d'une agglomération, l'intérêt de diversifier le type de toitures et les modes de conception.

Les résultats de GROOVES convergent avec une étude réalisée entre 2014 et 2016 par la haute école du paysage, de l'ingénierie et de l'architecture (Hepia) en Suisse sur trente toitures végétalisées à Genève [23]. L'analyse de la végétation a démontré que « les toitures intensives présentent un taux de recouvrement et une richesse spécifique plus élevés en espèces vasculaires. Les toitures extensives accueillent davantage d'espèces menacées et moins de néophytes invasives ». La moitié de la flore recensée est spontanée. Concernant la faune, il apparaît que les systèmes intensifs sont plus favorables à l'installation d'espèces animales. Les bienfaits d'une toiture végétalisée sur la biodiversité dépendent notamment d'un substrat profond (> 12 cm) à épaisseur variable et présentant différentes strates de végétation. Les qualités des toitures végétalisées en matière de rétention des eaux pluviales ont également été confirmées.

Dans la continuité de la thèse de Yann Duzsa (IEES-Paris), il apparaît clairement que l'on ne peut pas tout attendre des toitures végétalisées, que ce soit en matière d'accueil de la biodiversité, de gestion de l'eau, de rafraîchissement ou de pollinisation. En revanche, il est possible de les concevoir et de les gérer afin d'optimiser certaines de ces fonctions, selon le secteur où l'on se trouve ou les objectifs fixés par la collectivité.

Cette évolution de la prise en compte de la biodiversité se traduit également dans les récentes règles professionnelles du paysage sur la végétalisation des toitures, rédigées par l'Union Nationale des Entreprises du Paysage, avec une attention particulière portée à la prise en compte des aspects écologiques et de biodiversité.

Le mode de conditionnement des végétaux n'échappe pas lui non plus à des logiques industrielles tendant à standardiser des produits pour les besoins de leur commercialisation. Ainsi, la plupart des toitures végétalisées sont généralement proposées sous la forme de végétaux conditionnés au préalable en pépinières ou en site de production. Il peut s'agir de bacs, de caissettes ou de tapis pré-cultivés, assemblés directement sur la toiture, comme c'est le cas pour 10 toitures étudiées dans GROOVES. D'autres modes de conception plus proches des techniques de paysage existent et consistent à implanter des micro-mottes

directement dans le substrat (7 toitures) ou à réaliser des semis ou plantations (14 toitures). Moins courante, la pratique de l'hydroseeding a été réalisée sur 2 des toitures étudiées. Elle consiste à mettre en œuvre sur le sol une émulsion comportant eau, semences, fertilisants et fixateurs dans le but de recréer rapidement un couvert végétal. Enfin, les toitures « wildroof » ne nécessitent quant à elles aucune plantation, la végétation y pousse spontanément au gré du transport des graines par le vent ou par la faune.

D'autres modes de conception des toitures, inspirés des habitats naturels, pourraient être imaginés (pelouses sèches, sablonneuses, milieux méditerranéens, etc.). Il est également possible de privilégier des espèces locales et adaptées aux conditions climatiques, en s'inspirant des milieux alentours pour créer la toiture végétalisée (utilisation d'un substrat local, implantation de graines sauvages prélevées à proximité, etc.) ou encore en s'appuyant sur des filières courtes, à l'instar de la démarche Végétal Local portée par Plante & Cité. Suite à l'étude GROOVES, la toiture végétalisée de l'école des Sciences et de la biodiversité à Boulogne-Billancourt fait actuellement l'objet d'un réensemencement à partir d'épandage de

foin et de graines (Sauge des prés, Brome érigé, Amourette) récoltées dans une prairie à proximité. L'agence d'architecture Chartier Dalix et l'écologue Aurélien Huguet, à l'initiative de cette opération, souhaitent faire évoluer la composition floristique vers une plus importante quantité d'espèces vivaces, florifères, locales et adaptées aux conditions du site.

L'origine des substrats n'est pas connue pour l'ensemble des toitures. Un travail d'investigation plus poussé pourrait permettre de remonter jusqu'à la source mais n'est pas toujours évident compte tenu de l'ancienneté de certaines toitures et de la difficulté d'accéder à certaines compositions commerciales. Avec l'augmentation de la demande en toitures végétalisées (et par conséquent de celle en substrat) se pose la question de leur mode de production. C'est notamment le cas pour les toitures conçues avec de la terre agricole, entraînant la plupart du temps un décapage de terres fertiles et par conséquent un déplacement des impacts. Privilégier des substrats de récupération (terres excavées de chantier, mélanges de récupération et de concassage, compost) semble une voie d'avenir pour réduire l'empreinte écologique.



Ophélie Ricci et Amandine Gallois s'emploient à rechercher les invertébrés sur le toit d'une crèche à Paris. © Audrey Muratet | ARB îdF

RECOMMANDATIONS POUR UNE MEILLEURE GESTION

Les toitures végétalisées peuvent faire l'objet d'une gestion, que ce soit pour contrôler l'étanchéité, pour retirer certaines plantes ligneuses non désirées, ou encore pour correspondre à certaines attentes esthétiques du gestionnaire. Il est également possible de ne pas les entretenir et laisser la biodiversité s'exprimer, si toutefois la conception le permet et que le gestionnaire en accepte la flore spontanée. Parmi les toitures analysées dans GROOVES, 21 d'entre elles ne font l'objet d'aucune gestion tandis que 13 présentent une gestion. Ces interventions sont variables, allant de la fauche, à la tonte (observée sur une toiture), voire jusqu'au paillage. Comme pour les espaces verts, la gestion des écosystèmes urbains est souvent associée à une vision particulière de la nature, plus ordonnée, qui ne se justifie pas du point de vue écologique. Il n'est pas nécessaire d'être trop interventionniste, un seul voire quelques passages

par an pour l'arrachage des ligneux sont suffisants au maintien de la toiture dans le temps. Une gestion trop intensive pourrait avoir un impact négatif sur la richesse floristique et sur le tassement des sols. De même, il n'est pas nécessaire d'arroser systématiquement. Bien que certaines toitures aient été choisies pour des raisons esthétiques, l'acceptation des saisons, des changements de couleurs ou d'aspect, font aussi partie d'un autre regard sur la nature.

Laisser proliférer la végétation spontanée s'avère être primordial pour les pollinisateurs et autres invertébrés, tout autant que la multiplication des strates végétales. De plus, une strate herbacée dense et bien développée améliorera la capacité d'évapotranspiration et la rétention d'eau de la toiture. Pour favoriser l'accueil des pollinisateurs et autres invertébrés, la création de micro-habitats (bois mort, pierres sèches, tiges creuses, substrat sableux nu pour les abeilles sauvages) sont aussi des solutions qui enrichissent l'attractivité des toitures à condition d'être cumulées avec une végétation adaptée.



L'acceptation des saisons, des changements de couleurs ou d'aspect, font partie des cycles de la nature.
Toitures végétalisées du siège de GTM Bâtiment, à Nanterre (92) conçue et gérée par Topager. © Maxime Zucca | ARB îdF



Le bois mort ou les souches peuvent constituer des habitats supplémentaires pour la faune. © Marc Barra | ARB idF

ATTENTION À L'EMPREINTE ÉCOLOGIQUE!

Les toitures végétalisées ont pour objectif d'apporter un bénéfice global à l'environnement. Encore aujourd'hui, le marché des toitures végétalisées a

trop largement recours à une logique industrielle en proposant des systèmes de végétalisation assortis d'une panoplie de composants artificiels comme les systèmes d'arrosage, les fertilisants, les bacs plastiques, les géotextiles non biodégradables... Ces choix peuvent venir affecter le bilan carbone et l'empreinte écologique des toitures végétalisées.



Les toitures végétalisées sont souvent proposées sous la forme de végétaux conditionnés en site de production. Une analyse de cycle de vie (ACV) pourrait s'avérer nécessaire pour évaluer leur impact global. © Marc Barra | ARB idF

Dans le cadre de l'étude GROOVES, il n'a pas toujours été possible de remonter jusqu'au concepteur et d'avoir accès à la composition des systèmes commercialisés. C'est par des observations directes que nous avons relevé les divers composants des systèmes de végétalisation. En dehors du complexe d'étanchéité de la toiture, qui s'avère indispensable, du substrat et des plantes, les toitures végétalisées peuvent contenir de 0 à 4 éléments artificiels supplémentaires. Il s'agit principalement de bacs plastiques contenant les végétaux ou utilisés comme couche de drainage, de géotextiles, membranes ou feutres non biodégradables, de filets en plastique ou de nattes de coco, ou encore de systèmes d'arrosage intégrés (goutte à goutte). Si l'on tient compte du complexe d'étanchéité et de drainage, ce nombre peut s'élever à 8 (pare-vapeur, couche isolante, bandelettes en aluminium, anti-racine). Parmi les 36 toitures de GROOVES, 13 d'entre elles ne présentent aucun composant artificiel mais uniquement du substrat et les plantes, ce qui confirme qu'il est possible de limiter le recours à des matériaux potentiellement énergivores à produire et pouvant laisser des traces (nombreux débris plastiques issus de la dégradation des systèmes, parfois sur des toitures très jeunes). Cet aspect ne doit pas être négligé, d'autant plus que ces éléments artificiels viennent renchérir le coût des toitures végétalisées. Un bilan carbone ou une analyse de cycle de vie (ACV) des systèmes de végétalisation pourrait s'avérer nécessaire.



Certains systèmes de végétalisation se dégradent et peuvent laisser des traces. S'affranchir du plastique est plus que jamais essentiel dans la conception des toitures végétalisées
© Marc Barra | ARB îdF



Audrey Muratet identifie la flore sur le toit d'une résidence de Paris Habitat, Boulevard de Charonne à Paris © Ophélie Ricci | ARB îdF

CONCLUSION

L'étude GROOVES a permis d'améliorer notre connaissance des toitures végétalisées, tant sur leur contribution à l'accueil de la biodiversité que sur les bénéfices qu'elles sont susceptibles d'apporter au milieu urbain. Les résultats viennent confirmer que parler des « bénéfices des toitures végétalisées » de façon générique n'est pas suffisamment informatif, tant la diversité des modes de conception et de gestion influence leur écologie. Grâce à un échantillonnage couvrant cette diversité et à la mise en place de protocoles spécifiques, cette étude nous offre un regard plus juste sur les performances habituellement attribuées aux toitures végétalisées. Rétention des eaux pluviales, rafraîchissement de l'air et stockage de carbone, sont autant de services donnés pour acquis par les concepteurs dont l'efficacité est en réalité loin d'être universelle. Cette étude vient confirmer que les toitures végétalisées sont attractives pour la biodiversité urbaine et peuvent devenir des habitats complémentaires, voire de substitution, aux espaces de nature au sol. Cet intérêt pour la biodiversité est confirmé pour tous les types de toitures, y compris pour les typologies habituellement dénoncées pour leur faible diversité, et dont GROOVES montre qu'elles représentent des écosystèmes originaux offrant des habitats bien spécifiques pour le vivant.

S'il semble utopique de rechercher un modèle de toiture végétalisée « idéal universel », l'étude GROOVES nous encourage au contraire à perpétuer des modes de conception diversifiés et hétérogènes à l'échelle de la ville. Cependant, il existe une marge d'amélioration possible aux techniques actuelles. En effet, certaines toitures présentent des choix de conception trop uniformes ou sans lien avec les services écosystémiques visés, qui ne permettent pas de conclure à un intérêt environnemental. A l'avenir, la conception et la gestion des toitures végétalisées pourraient davantage s'inspirer du fonctionnement de certains écosystèmes naturels dont les toitures semblent se rapprocher. Ce changement de paradigme ne peut se concrétiser que par le rapprochement entre écologues, paysagistes et concepteurs de toitures végétalisées.

Alors que les politiques en faveur de la nature en ville se déploient largement, nombreuses sont celles qui ne s'arrêtent qu'aux « effets de mode ». L'étude GROOVES a souhaité mettre en avant une démarche scientifique pour mieux conseiller les gestionnaires en formulant des recommandations et des conseils pour les futures générations de toitures végétalisées. Cette démarche d'évaluation de la biodiversité et des bénéfices a depuis été déployée sur d'autres types d'aménagements, à l'instar des parcelles en agriculture urbaine (BiSEAU) et des cimetières (COOL) dans l'espoir de mieux informer les collectivités.



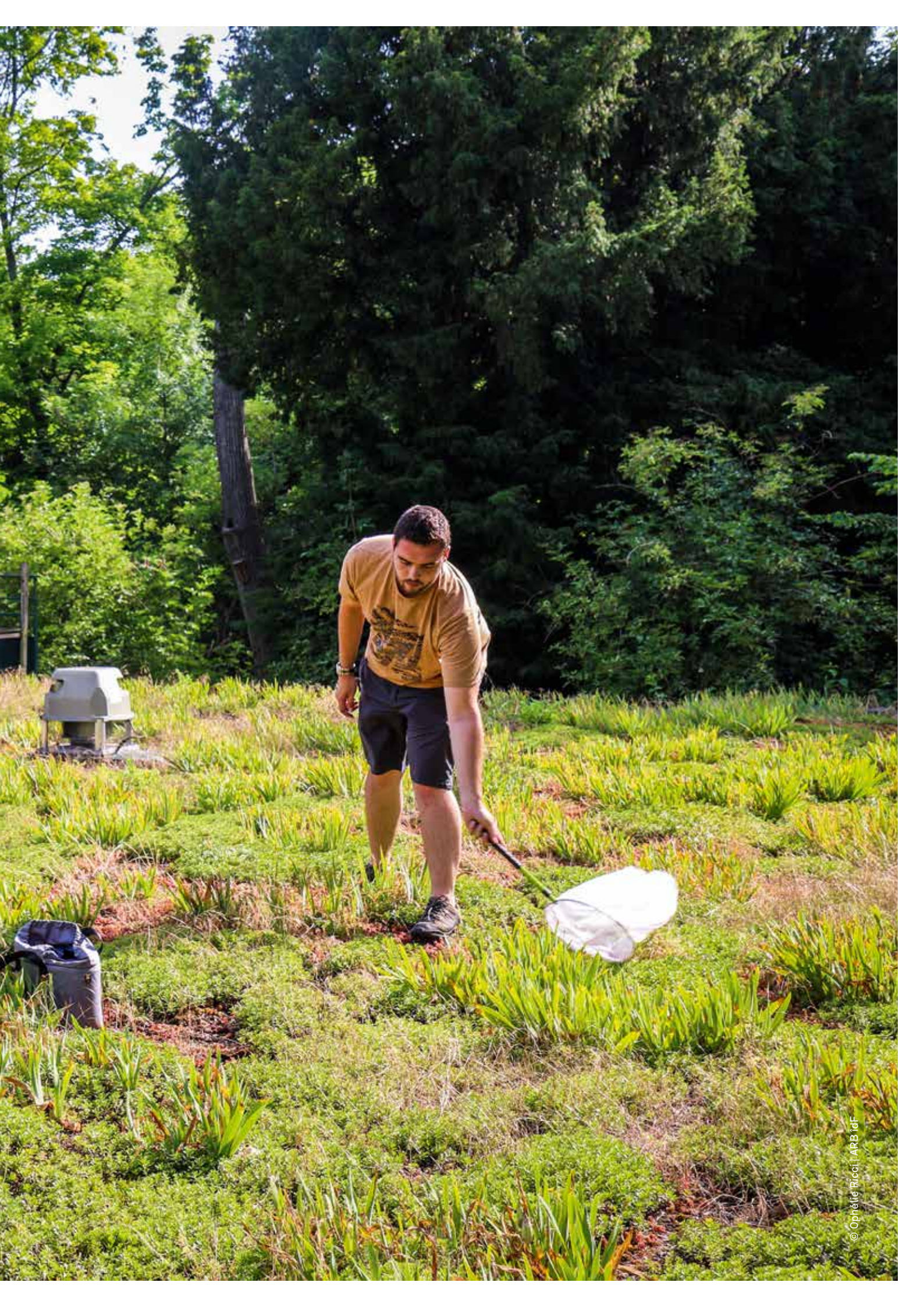
Les vipérines en fleur sur le toit du siège de GTM Bâtiment à Nanterre © Audrey Muratet | ARB idF



Lucile Dewulf contemple la plus vaste toiture végétalisée de notre étude, sur le Hall 7 du Parc des Expositions de Villepinte © Audrey Muratet | ARB idF

L'ÉTUDE GROOVES
UNE DÉMARCHE
SCIENTIFIQUE POUR
MIEUX CONSEILLER
LES GESTIONNAIRES
EN FORMULANT DES
RECOMMANDATIONS
ET DES CONSEILS POUR
LES FUTURES GÉNÉRATIONS
DE TOITURES VÉGÉTALISÉES.







01

L'étude **GROOVES** s'intéresse à la biodiversité et aux services écosystémiques de

36 TOITURES SUR LE TERRITOIRE DU GRAND PARIS

18 extensives, 6 semi-intensives
8 intensives, 4 « wildroof ».

02

L'origine des plantes est variée : locale ou plus lointaine, méditerranéenne, continentale, nord-américaine.

03

Les toitures abritent en moyenne une **diversité** en plantes similaire à celle rencontrée dans les **friches** et les **parcs urbains**.

04

La **hauteur du bâtiment est corrélée à la richesse en plantes spontanées**, en syrphes et en abeilles sauvages. L'effet est positif jusqu'à environ 10 mètres de hauteur (3 étages).



05

Les toitures végétalisées ont vu leurs **surfaces décupler** depuis les années 2000.

06

Face à l'industrialisation des méthodes de conception, des **incertitudes** persistent sur leur **capacité à répondre aux multiples enjeux environnementaux**.



07

400 ESPÈCES DE PLANTES ONT ÉTÉ INVENTORIÉES

dont **70 % sont spontanées**.

La composition floristique est originale, souvent comparable à celle des pelouses sèches sableuses.

08

Les **teneurs en argile et en sable** permettent un maximum de richesse floristique autour de 10 et 60 % respectivement.

09

Les sols de toitures végétalisées présentent **des caractéristiques physicochimiques très particulières**, avec des combinaisons de propriétés texturales-chimiques qui ne sont pas représentées dans le référentiel national des sols du RMQS (Réseau mondial de qualité des sols).

10

On peut distinguer des espèces «toiturophiles» normalement peu représentées dans la matrice urbaine mais très fréquentes sur les toitures (ex : *Runcinia grammica*, *Nysius graminicola*, *Lygus pratensis*); **les espèces très généralistes**, communes sur les toits et au sol (ex : le Gendarme (*Pyrrhocoris apterus*), l'Épeire diadème (*Aranea diadematus*), la Punaise verte (*Nezara viridula*)); **les espèces « toiturophobes »** peu représentées sur les toitures alors qu'elles sont communes au sol (ex : la Pissaure admirable (*Pisaura mirabilis*), la Punaise nébuleuse (*Raphigaster nebulosa*), la Corée marginée (*Coreus marginatus*)).



11

40 TAXONS DE BRYOPHYTES (MOUSSES) ET LICHENS

ont été observés sur l'ensemble des toitures.

12

Les typologies « extensives » ont une faune et flore moins diversifiées que les autres.

13

La **richesse en pollinisateurs** sur les toitures intensives et semi-intensives est comparable à celle des autres espaces verts urbains.

14

La diversité en invertébrés est très fluctuante en fonction des toitures, avec des écarts importants entre les sites les moins riches (20 espèces) et ceux abritant le plus d'espèces (107 espèces).



15

AU-DELÀ DE 25 cm D'ÉPAISSEUR

la richesse floristique n'augmente plus alors que la diversité en pollinisateurs continue à augmenter.



611

ESPÈCES D'INVERTÉBRÉS

appartenant à de nombreux groupes taxonomiques dont en majorité des Hyménoptères (abeilles), Hémiptères (punaises), Coléoptères, Araignées...



17

Les toitures composées de **substrats « agricoles » et « mixtes » peuvent stocker davantage d'eau** que les toitures avec des substrats « minéraux ».

18

La dynamique des observations montre par ailleurs que pour une même toiture, **l'évapotranspiration peut-être 6 fois plus importante avec une végétation plus développée.**



20

Les sols de toitures végétalisées présentent en moyenne des **niveaux de biomasse microbienne très élevés** (129.4 µg ADN/g sol), de l'ordre du double du niveau moyen mesuré avec le référentiel RMQS (59.2 µg ADN/g sol).

19

SEULES 5 TOITURES SUR 26

SONT EN MESURE DE RÉGULER UNE PLUIE DÉCENNALE

Ces dernières (CIROB, FRANK, ALBAR, OLSER et PULMA) ont des substrats agricoles et s'approchent de 30 cm de profondeur.

21

Si les toitures peuvent participer au rafraîchissement, leur **efficacité sera très limitée en cas de période de canicule** avec une pluviométrie très faible.

22

Si la grande majorité d'entre elles ne présentent pas de pollution notable aux éléments traces métalliques, quelques-unes révèlent **des taux particulièrement élevés en plomb et en zinc**, au-delà des seuils de risques.

23

Il existe **d'importantes variations** entre toitures s'agissant **de la capacité de rétention d'eau** : 6 L/m² pour la moins absorbante contre 532 L/m² pour la plus absorbante.



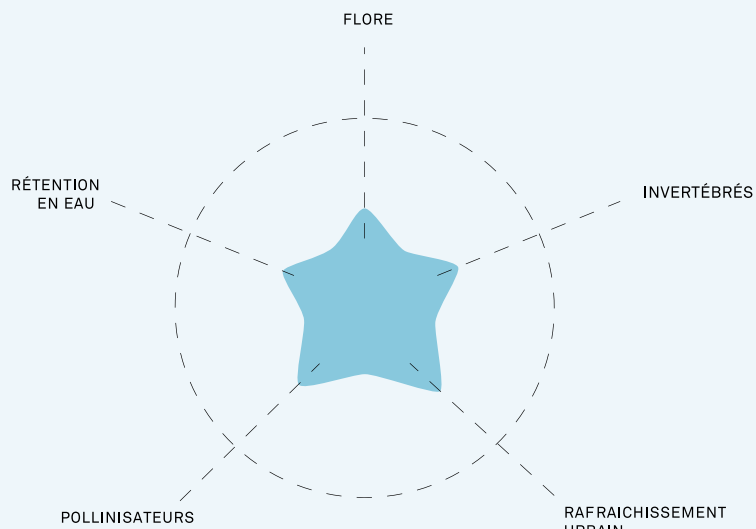
24

Les **toitures extensives** sont **moins riches en invertébrés** que les toitures intensives et semi-intensives. Elles possèdent cependant des communautés originales.

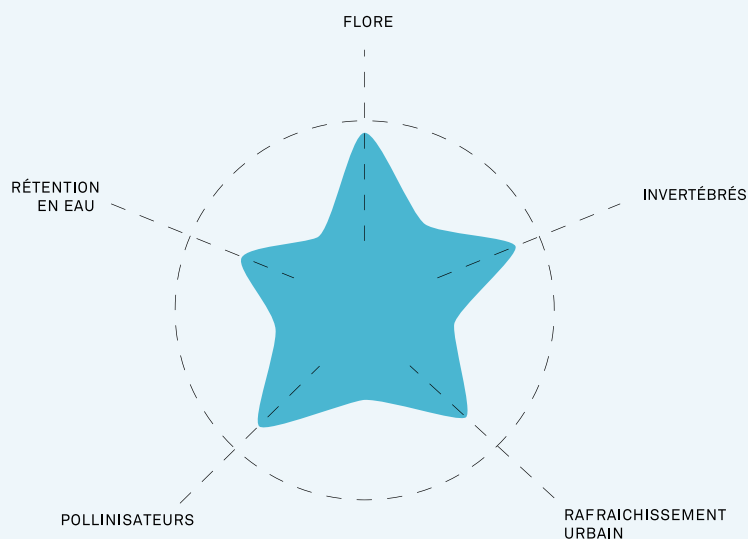
25

En matière de rafraîchissement, il existe une **importante variabilité de la capacité des toitures à évapotranspirer**, avec un rapport de 28 entre l'évapotranspiration maximale journalière la plus faible (PERIS) et la plus forte (ECOBIO).

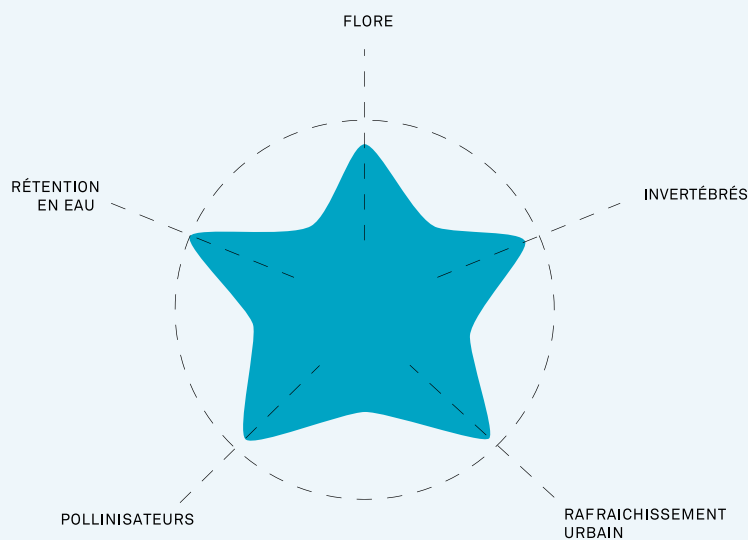
TOITURES EXTENSIVES



TOITURES SEMI-INTENSIVES



TOITURES INTENSIVES



Comparaison de l'efficacité des services écosystémiques rendus par les toitures en fonction de leur typologie. Les toitures extensives s'avèrent en moyenne 50 % moins performantes que les toitures semi-intensives et intensives dans les services évalués.

01

Sur les bâtiments en rénovation, effectuer préalablement un **diagnostic de la portance et de l'étanchéité**, pour déterminer la capacité de charge et adapter la profondeur de substrat



02

Il est possible de ne rien planter afin de **laisser la végétation spontanée s'implanter** (toitures Wildroof).



03

Afin de limiter l'empreinte écologique due aux matériaux, il est nécessaire de **s'inscrire dans une approche low-tech lors de la conception**, en limitant le nombre de composants artificiels (membranes géotextiles, bacs plastiques, etc.)

04

Certains aménagements peuvent être installés sur la toiture afin de **créer des habitats supplémentaires pour les espèces**, comme les enrochements, le bois mort déposé au sol ou éventuellement un point d'eau (mare).

05

Pour les toitures plantées, privilégier le choix de variétés locales pour les plantes, en s'appuyant sur certains fournisseurs (par exemple issus de la démarche Végétal local®). Il est également possible de collecter des graines sauvages dans des milieux proches.



06

Il est recommandé de faire **varier les profondeurs de substrat** au sein d'une même toiture pour **créer des conditions différentes pour la faune**. De la même manière, la **diversification des strates végétales** (muscinale, herbacée, arbustive voire arborée) est un gage de qualité.

07

Anticiper l'entretien dès la conception : un entretien trop fréquent peut porter atteinte à la biodiversité (fauche ou tontes, piétinement). Un simple contrôle est généralement suffisant, une à deux fois par an (ligneux indésirables, déchets). Si la toiture est accessible au public, prévoir des zones de déplacement et des zones préservées du piétinement.

08

Limiter le recours à des systèmes **pré-cultivés** (caissettes, tapis de culture) en privilégiant des plantations en micro-mottes ou en semis, en définissant sa propre composition floristique.

09

Eviter l'utilisation de terres **agricoles importées** en privilégiant un substrat à base de matériaux de réemploi (matériaux concassés comme la brique, compost ou terre de récupération)

10

Si la toiture n'est **pas cultivée**, il n'est **pas nécessaire d'intégrer un système d'arrosage** (même si la toiture change avec les saisons !)

11

Les toitures végétalisées sont **des écosystèmes dynamiques dont la végétation est susceptible d'évoluer avec le temps**. C'est un processus naturel inexorable faisant partie de la vie de la toiture. Il n'est pas nécessaire de vouloir maintenir à tout prix la palette végétale initialement plantée.



12

La **diversité des modes de conception** de toitures végétalisées est à privilégier à l'échelle d'une ville.

13

Des **connections entre la toiture végétalisée et le sol** peuvent être envisagées, par le biais de plantes grimpantes



SOURCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] France Stratégie. -« Objectif « Zéro Artificialisation Nette » :Quels leviers pour protéger les sols?(2019).
- [2] BARRA Marc, CLERGEAU Philippe. - « Zéro Artificialisation Nette » : des questions écologiques se posent. Revue Diagonal (2020).
- [3] Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France. - États de santé de la biodiversité en Île-de-France (2016).
- [4] Conseil régional d'Île-de-France. - Plan vert de l'Île-de-France : la nature pour tous et partout (2017).
- [5] CLERGEAU Philippe. - Urbanisme et biodiversité, vers un paysage vivant structurant le projet urbain. Apogée (2020)
- [6] Institut Paris Region. - Renaturer l'Île-de-France : vers un territoire plus résilient (2019)
- [7] Atelier Parisien d'Urbanisme. - Étude sur le potentiel de végétalisation des toitures terrasses à Paris, (2013)
- [8] SECC. - Intérêts de la végétalisation d'une toiture-terrasse (2019)
- [9] Madre, Frédéric & Vergnes, Alan & Machon, Nathalie. (2014). Green roofs as habitats for wild plant species in urban landscapes: First insights from a large-scale sampling. Landscape and Urban Planning.
- [10] BARRA Marc. - Villes résilientes, réconcilier urbanisme et nature - Revue Urbanisme (2020)
- [11] MADRE Frédéric. -Biodiversité et bâtiments végétalisés : une approche multi-taxons en paysage urbain, MNHN (2014)
- [12] DUSZA Yann. - Toitures végétalisées et services écosystémiques : favoriser la multifonctionnalité via les interactions sols-plantes et la diversité végétale, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, (2017)
- [13] GOURMAND Anne-Laure, MURATET Audrey, GALLOIS Amandine, HÉDONT Marianne, DÉTRÉE Jérémy. -Bilan 2018 du protocole Florilèges-prairies urbaines (2018)
- [14]TERRAT, Sébastien, Richard CHRISTEN, Samuel DEQUIEDT et al. (2012). « Molecular biomass and Meta-Taxogenomic assessment of soil microbial communities as influenced by soil DNA extraction procedure ». In : Microbial biotechnology 5.1, p. 135-141
- [15]Kate E. SMITH, Dominique WEIS, Catherine CHAUVEL, and Sibyle Moulin. (2020).« Honey Maps the Pb Fallout from the 2019 Fire at Notre-Dame Cathedral, Paris: A Geochemical Perspective ». Environmental Science & Technology Letters - DOI: 10.1021/acs.estlett.0c00485
- [16] PREVOST-BOURE, Nicolas Chemidlin, Richard CHRISTEN, Samuel DEQUIEDT et al. (2011). « Validation and application of a PCR primer set to quantify fungal communities in the soil environment by real-time quantitative PCR ». In : PloS one 6.9, e24166
- [17] KAIZERMANN Aurore, Pierre-Alain MARON, Léa BEAUMELLE et al. (2015). « Fungal communities are more sensitive indicators to non-extreme soil moisture variations than bacterial communities ». In : Applied Soil Ecology 86, p. 158-164
- [18] CONSTANCIAS Florentin, Sébastien TERRAT, Nicolas PA SABY et al. (2015). « Mapping and determinism of soil microbial community distribution across an agricultural landscape ». In : MicrobiologyOpen 4.3, p. 505-517
- TERRAT, Sébastien, Walid HORRIGUE, Samuel DEQUIEDT et al. (2017). « Mapping and predictive variations of soil bacterial richness across France ». In : PloS one 12.10, e0186766 /
- VIAUD, Valérie, Patricia SANTILLÁN -CARVANTES, Nouraya AKKAL -CORFINI et al. (2018). « Landscapescale analysis of cropping system effects on soil quality in a context of crop-livestock farming ». In : Agriculture, ecosystems & environment 265, p. 166-177
- [19] BONFANTE, Paola. (2018), The future has roots in the past: the ideas and scientists that shaped mycorrhizal research. New Phytol, 220: 982-995. <https://doi.org/10.1111/nph.15397>
- [20] KARIMI, Battle, Samuel DEQUIEDT, Sébastien TERRAT et al. (2019). « Biogeography of Soil Bacterial Networks along a Gradient of Cropping Intensity ». In : Scientific reports 9.1, p. 3812
- [21] ADIVET, - Règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées (2018)
- [22] David RAMIER, Emmanuel BERTHIER, Didier GALLIS, Antoine DUSSUCHALE, Pierre PINTA, et al. (2013). « analyse du fonctionnement hydrologique de toitures végétalisées : observations et modélisations ». Quelles innovations pour la gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain (hal-01713134)
- [23] HEPIA. - Rapport final du projet « Toitures végétalisées » (TVEG) dans l'agglomération genevoise. (2016)

POUR ALLER PLUS LOIN

Marc Barra, ARB îdF. « Bâtir en favorisant la biodiversité », 2012

https://www.arb-idf.fr/sites/arb-idf/files/document/ressources/batir_en_favorisant_la_biodiversite.pdf

Audrey Muratet, François Chiron & Myr Muratet « Manuel d'écologie urbaine », Les presses du réel, 2019

<http://www.lespressesdureel.com/ouvrage.php?id=7214>

Ligue de Protection des Oiseaux (LPO) - Guide technique « Biodiversité et bâti : comment concilier nature et habitat ? », 2014

<http://biodiversiteetbati.fr/sommaire.htm>

Marc Barra. « Bâtiment et biodiversité : 15 propositions pour changer les pratiques de construction et d'aménagement ». Natureparif, 2013

https://www.arb-idf.fr/sites/arb-idf/files/document/ressources/15-propositions-transition-ecologique-batiment_natureparif.pdf

« Recueil d'actions exemplaires de collectivités françaises – 2017 : Capitale française de la biodiversité – Aménager, rénover et bâtir en favorisant la biodiversité », ARB Île-de-France, 2017

<http://arb-idf.fr/publication/recueil-dactions-amenager-renover-et-batir-en-favorisant-la-biodiversite-2017>

Ville de Lausanne. Toitures végétalisées : Guide de recommandations

Pourquoi et comment accueillir la nature sur son toit
https://aapq.org/sites/aapq.org/files/bibliotheque/brochure_toiturevegetale_lausanne.pdf

ARB îdF, Conseil départemental de la Seine-Saint-Denis, Plante & Cit&, Muséum national d'Histoire naturelle. Guide | « Réaliser des toitures végétalisées favorables à la biodiversité » (2011)

https://www.arb-idf.fr/sites/arb-idf/files/document/ressources/fiche_technique_toitures_vegetalisees_0.pdf

Guide des toitures végétalisées et cultivées - Mairie de Paris, 2018

<https://urbanisme-bati-biodiversite.fr/IMG/pdf/document.pdf>

CEUM, Les plantes grimpantes, une solution rafraîchissante

[https://cdn.ca.yapla.com/company/CPY09qxj5LhP6vbo8lrLkiEO/asset/files/Plantes%20grimpantes%20une%20solution%20rafraichissante_version%20finale\(3\).pdf](https://cdn.ca.yapla.com/company/CPY09qxj5LhP6vbo8lrLkiEO/asset/files/Plantes%20grimpantes%20une%20solution%20rafraichissante_version%20finale(3).pdf)

Journée d'échanges sur l'étude GROOVES, ARB îdF :

<https://www.arb-idf.fr/article/videos-ecologie-des-toitures-vegetalisees-retour-sur-la-journee-de-destination-de-letude>

G. Hamon. Rapport de stage | Etude des communautés d'arthropodes des toitures végétalisées d'Île-de-France, 2019.

https://www.arb-idf.fr/sites/arb-idf/files/document/ressources/rapport_arthropodes_guillaume_hamon.pdf

A. Decourcelle. Rapport de stage | Écologie des toitures végétalisées en Île-de-France : Analyse comparative des services rendus par les substrats, 2018

https://www.arb-idf.fr/sites/arb-idf/files/document/ressources/adeline_decourcelle_rapport_stage_m2_bee_version_finale.pdf

H. Johan. Rapport de stage | Étude sur la biodiversité des toitures végétalisées en Île-de-France (2017)

https://www.arb-idf.fr/sites/arb-idf/files/document/ressources/rapport-stage-hemminki-johan-grooves_2017.pdf

Suivi Photographique des Insectes POLLinisateurs - Muséum national d'Histoire naturelle

<https://www.spipoll.org/>

Vigie-Flore – Muséum national d'Histoire naturelle

<http://www.vigienature.fr/fr/vigie-flore>

REMERCIEMENTS

Partenaires techniques et financiers

L'ARB îdF a bénéficié du soutien de partenaires contributeurs ou mécènes, dont la Métropole du Grand Paris, la Région Île-de-France, l'Agence de l'eau Seine Normandie, la Fondation Placoplatre, le Syndicat national du béton prêt-à-l'emploi (SNBPE), l'Adivet et les Entreprises du paysage (Unep).

Gestionnaires des toitures

Résidences Paris Habitat

Christophe DAVALO, Clarisse BERGER, Clarence BARENGER

École des Boutours (Rosny-sous-Bois)

Julie BESCO, Emmanuel PEZRES

Centre de loisirs du Val Caron (Courbevoie)

Jacques MACRET

Bâtiment Technique CD93 (La Courneuve)

Clémence BRUNET, Mehdi AZDOUD

Château de Vincennes

Bruno PHILIP, Henry LEBON

Cité de la mode et du Design (Paris)

Llewelyn BORSATTO BILLS, Didier LAHAYE

Cinéma Robespierre (Vitry-sur-Seine)

Julien FABRE

École des sciences et de la biodiversité (Boulogne-Billancourt)

Sophie DERAMOND, Laurence PERDRIAT

École Eiders (Paris)

Corinne ORSAT

École Fontanes (Courbevoie)

Jacques MACRET

École Rosalind Franklin (Ivry-sur-Seine)

Fabrice BOURBAN

Fondation Good Planet (Paris)

Antoine ROCHARD

Centre commercial Beaugrenelle (Paris)

Céline CORTEZ CLAUDINO

Siège GTM Bâtiment (Nanterre)

Flavie MAYRAND, Aliénor LAYET

Collège Lucie Aubrac

Patricia MARIE

Médiathèque de Choisy-le-Roi

Guillaume GIRARD

Bâtiment Mozinor (Montreuil)

Patrice ASTEQUE, Patrick BOUSCAREL

Bâtiment d'entomologie du MNHN (Paris)

Laurent PALKA, Flavie MAYRAND

École Olivier de Serre (Paris)

Cédissia ABOUT DE CHASTENET

Parc des expositions de Villepinte

Fabrice SALANGE, Philippe DUBUQUET

Bâtiment Le Périscope (Paris)

Catherine CHAILLOUX, Michèle SEGUY

Protection maternelle et infantile à Antony

Catherine JOUFFLIN

Hôtel Pullman (Paris)

Frédéric MADRE

Médiathèque Romain Rolland (Romainville)

Pascale LE CORRE

La Seine musicale (Boulogne-Billancourt)

Alexandre GAUFFIER

ÉCOLOGIE DES TOITURES VÉGÉTALISÉES

Synthèse de l'étude GROOVES
Green Roofs Verified
Ecosystem Services
2017 - 2019

Depuis les années 90, la montée en puissance des politiques de nature en ville s'est accompagnée d'un regain d'intérêt pour les toitures végétalisées. De multiples avantages écologiques sont généralement associés à la végétalisation des toits, qu'il s'agisse de l'accueil de la biodiversité, de la rétention d'eau, du stockage de carbone, mais ces bénéfices sont encore mal évalués dans la réalité. Afin de combler ces lacunes, et en continuité avec des travaux de recherche précédents sur le sujet, l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France a engagé en 2017 l'étude GROOVES (pour Green ROOfs Verified Ecosystem Services), avec l'appui du Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN), du Conservatoire botanique national du Bassin parisien (CBNPB), de l'Institut d'Écologie et des Sciences de l'Environnement IEES-Paris et de l'Institut National de Recherche pour l'agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE- UMR Agroécologie Dijon). 36 toitures de typologies différentes (extensives, semi-intensives et intensives) ont fait l'objet d'analyses, via des inventaires des plantes et des invertébrés (dont les pollinisateurs), et des prélèvements de substrats, afin de mieux comprendre leur état et rôle écologique.

Après 3 années d'étude, les premiers résultats viennent confirmer le rôle joué par les toitures végétalisées sur l'accueil de la biodiversité et la capacité à remplir des fonctions écologiques. Ils montrent aussi que ces bénéfices varient grandement entre les systèmes de végétalisation mis en place, ce qui permet de dégager quelques grandes tendances pour les concepteurs et les gestionnaires.



INRAE



Cerema



Région
Île de France



SNBPE



seine-saint-denis
LE DÉPARTEMENT