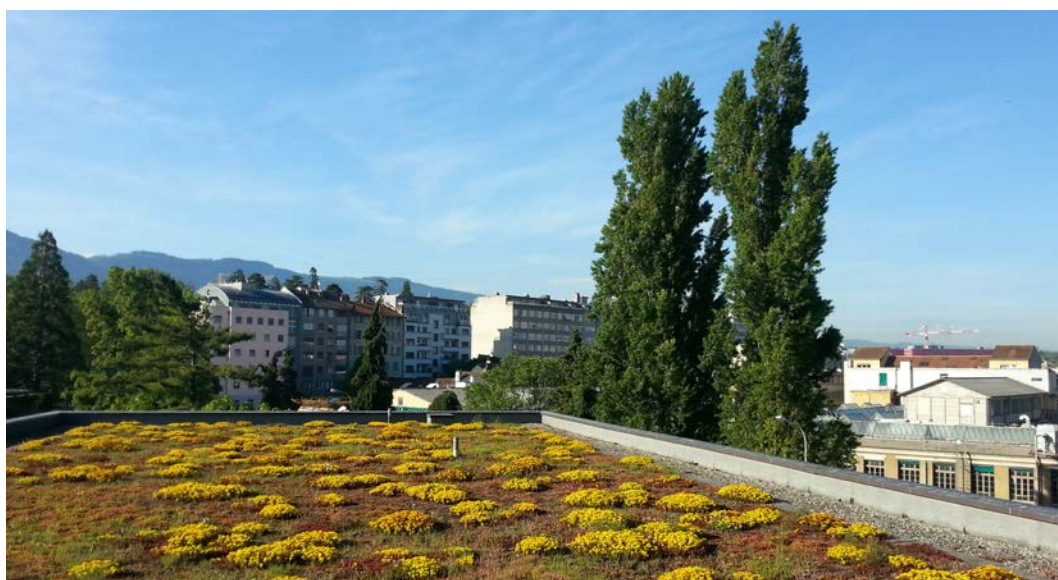


Rapport final du projet « Toitures végétalisées » (TVEG) dans l'agglomération genevoise

2014-2016



Genève, le 23 février 2016

Responsables du projet :

Sophie Rochefort

Patrice Prunier

Pascal Boivin

Reto Camponovo

David Consuegra

I. Introduction générale et rappel des objectifs du projet

En milieu urbain, le phénomène d'îlots de chaleur et l'accroissement du nombre d'évènements climatiques extrêmes dans un contexte de changement climatique inquiètent les planificateurs. Les extrêmes de chaleur engendrent des répercussions négatives sur la santé des habitants. Le risque hydrologique urbain (pluies extrêmes) devient un danger majeur et la biodiversité urbaine est menacée. Parmi les mesures de prévention, de nombreuses études ont démontré que la végétalisation des infrastructures et la protection des espaces verts sont d'une importance capitale. Toutefois, dans le Canton de Genève, qui compte une des plus grandes villes de la Suisse, l'impact et les bénéfices du développement des toitures végétalisées sur la qualité thermique, le risque hydrologique, ainsi que sur la biodiversité, n'ont pas été évalués. Un diagnostic climatique et environnemental ainsi qu'une évaluation des performances de ces infrastructures sont urgents.

Le présent projet vise à :

1. Mesurer l'impact des toitures végétalisées sur le micro climat urbain et déterminer les bénéfices pour la qualité thermique des bâtiments;
2. Quantifier l'effet des toitures végétalisées sur l'hydrologie urbaine, déterminer leur bilan hydrique, fournir les bases pour la modélisation de leurs effets à l'échelle du quartier;
3. Caractériser la biodiversité floristique et entomologique des toitures végétalisées, et évaluer les services écosystémiques de cette entomofaune urbaine ainsi que la sensibilité de cette biodiversité aux changements climatiques;
4. Elaborer ainsi des outils d'aide à la décision tenant compte de l'interaction entre ces facteurs pour décliner une meilleure implantation et garantir une efficacité optimale des toitures végétalisées ;
5. Répondre aux objectifs de la Loi sur la Biodiversité et son règlement d'application ainsi qu'au Programme Nature en ville cantonal ;
6. Etablir dans quelle mesure ces toitures végétalisées doivent s'intégrer dans le développement territorial afin qu'elles jouent pleinement leurs rôles dans un contexte de changement climatique.

II. Sélection des toitures végétalisées

Pour répondre aux objectifs, trente toitures ont été sélectionnées sur le canton de Genève en fonction des critères suivants :

- leur localisation en zone urbaine
- le type de toitures i.e. extensives vs intensives
- l'âge de la toiture. Les toitures sélectionnées ont au minimum deux ans d'existence pour garantir l'installation de la végétation, et ont été classées en deux catégories : plus de 10 ans et moins de 10 ans

La plupart des toitures sélectionnées ont une superficie minimum de 400 m². Cette superficie minimale a été déterminée en fonction des besoins notamment pour le volet thermique. En effet, une superficie inférieure ne permettrait pas de détecter des effets significatifs. Les toitures végétalisées installées sur des structures non isolées ou non chauffées n'ont pas été

retenues également afin de répondre à certaines questions du volet thermique notamment dans les mesures de flux d'énergie. Enfin, l'autorisation et les conditions d'accès ont été un facteur déterminant pour l'intégration des toitures végétalisées au projet.

La liste des toitures sélectionnées est présentée dans les tableaux 1 et 2. Cette liste de toitures a servi de base pour la sélection des toitures suivies dans le cadre des autres volets du projet (thermique et climatique, substrat et rétention en eau). A la fin du document est présenté la localisation de ces différentes toitures sur le canton de Genève.



Figure 1. Toitures végétalisées n° 11, 42, 62 et 61.

III. Catégorisation des toitures végétalisées étudiées

Le critère principal qui a été choisi pour différencier une toiture extensive d'une toiture intensive est l'épaisseur du substrat. Une toiture a été classée comme « extensive » si l'épaisseur du substrat était inférieure à 15 cm et « intensive » si l'épaisseur du substrat était de plus de 25 cm sur au moins sur la moitié de la surface de la toiture.

Catégorie extensive : La majorité (70%) des toitures extensives étudiées ont moins de 8 cm de substrat de type matériaux industriels. Seules 3 toitures, n°15, 16, 17 (15% des extensives) ont un substrat à dominante terreuse (caractérisation visuelle). Parmi les 17 toitures avec un substrat de type « matériaux industriels », seules 2 toitures, n° 42 et 63, ont un substrat un peu plus épais (8 à 12 cm), et une autre toiture, n° 14, présente une épaisseur de 6 à 8 cm avec des monticules transversaux d'environ 10 cm de haut, placés régulièrement sur toute la surface végétalisée, et équivalant à 1/5 de la surface totale.

Catégorie intensive : La majorité des toitures classées comme intensives dans l'étude ont plus de 25 cm de substrat de type terre végétale (70% des toitures intensives). Les 3 autres toitures classées comme intensives (33, 33bis, 62) ont un substrat visuellement plus minéral que les autres toitures intensives, ainsi qu'un profil « plus extensif » en termes de végétation; elles représentent une tendance actuelle dans la végétalisation des toitures. Sur chacune de ces 3 toitures, l'épaisseur du substrat est variable (de 8 à 60 cm) mais de plus de 25 cm sur plus de la moitié de sa surface, ce qui justifie leur classement en tant que toitures intensives.

Tableau 1. Liste des toitures extensives sélectionnées dans le cadre du projet.

Extensives de moins de 10 ans		
No.	Bâtiment	Adresse
1	Maison de quartier des grands Hutins	Rue de la Tambourine 1, Carouge
2	Ecole des Promenades	Boulevard des Promenades 24, Carouge
3	Ecole de la vigne rouge	Chemin de la Vigne rouge 2, Carouge
11	Espace Hippomène Le Cube	Avenue de Châtelaine 7
14	Bâtiment de la HEAD	Rue de la Prairie 4
7	EMS les Marronniers	Chemin Bessonnette 9, Chênes Bougeries
45	Pavillon de l'enfance	Chemin de Champ-Claude 6, Vernier
42	Ecole des Petites Fontaines	Chemin de la Mère-Voie 50, Plan-les-Ouates
37	EMS Fondation Butini	Chemin Gustave-Rochette 14, Onex
38	EMS de la Rive - Grand Lancy	Route de Grand-Lancy 166, Onex

Extensives de plus de 10 ans		
No.	Bâtiment	Adresse
15	Ecole de l'Europe bat C	Avenue d'Aïre 42, Genève
16	Ecole de l'Europe bat B	Avenue d'Aïre 42, Genève
17	Ecole de l'Europe bat A partie haute	Avenue d'Aïre 42, Genève
34	Station de Service de Moillebeau (TAMOIL)	Chemin Petit-Saconnex 5, Genève
63	HUG	Avenue de la roseraie 51, Genève
53	Centre social Lancy	Avenue des Communes-réunies 86bis, Lancy
64	Piscine Onex	Rue des Bossons 5, Onex
65	Centre La Praille	Route des Jeunes 10, Carouge
66	Bureau de la FTI-terrasse haute	Avenue de la Praille 50, Carouge
67	Bureau de la FTI -terrasse basse (hangars devant le bureau)	Avenue de la Praille 50, Carouge

Tableau 2. Liste des toitures intensives sélectionnées dans le cadre du projet.

Intensives de moins de 10 ans		
No.	Bâtiment	Adresse
6	Club des aînés	Boulevard des Promenades 18, Carouge
33	Ecole du Pommier	Rue Sonnex 4-6, Grand-Saconnex
33bis	Ecole du Pommier, salle de gym	Rue Sonnex 4-6, Grand-Saconnex
8	Collège de la Seymaz	Avenue Mirany 36, Chêne-Bourg
62	HUG (urgences pédiatriques)	Avenue de la roseraie 47, Genève

Intensives de plus de 10 ans		
No.	Bâtiment	Adresse
61	Agence Zurich Assurance	Avenue Eugène-Pittard, 16, Genève
60	Garage Autobritt	Rue du Grand Pré, Genève
40	Ecole horlogerie	Avenue du Pont butin, 43 , Petit Lancy
44	Ecole du Petit Senn	Avenue Petit Senn 13, Chêne-Bourg
52	Coop des Augustins	Rue Dancet 35-37, Genève

IV. Réalisation du rapport

Le rapport est présenté sous la forme de différents « sous-rapports » relatifs aux volets abordés par les groupes de recherche du projet. Chaque volet du rapport a tenté de mettre en lumière les éléments importants qui ressortent de l'étude relative à son domaine mais également en les confrontant aux résultats de domaines connexes le cas échéant.

Les différents volets du rapport et leurs auteurs sont les suivants :

Volet biodiversité floristique (hepia) : Patrice Prunier (professeur HES et responsable), Marianne Hédont (assistante HES) et Julie Steffen (assistante de recherche)

Volet biodiversité entomologique (hepia) : Sophie Rochefort (professeur HES et responsable) et Gaël Pétremand (assistant de recherche)

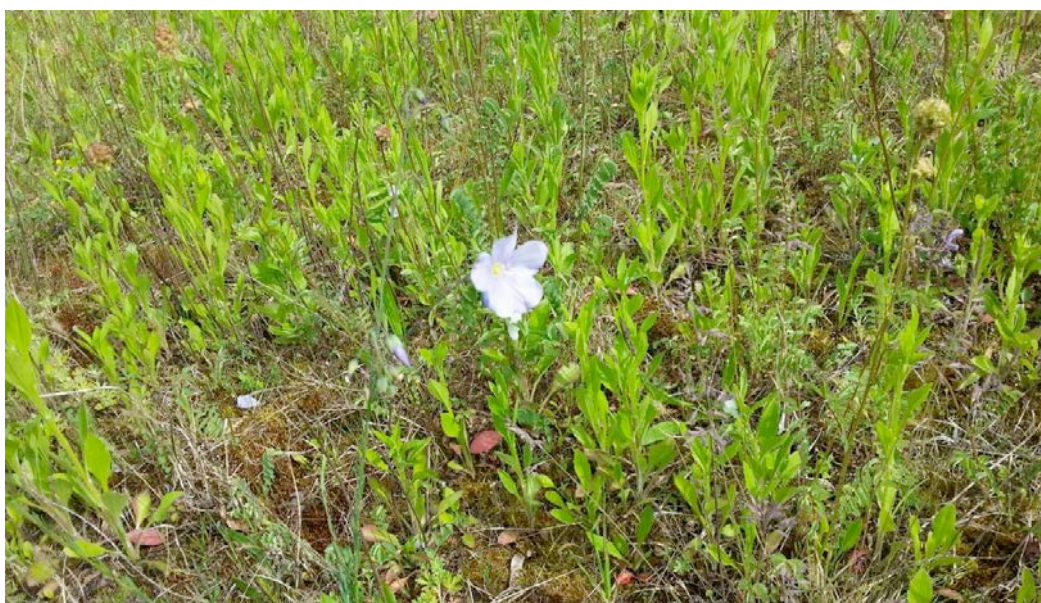
Volet substrat et hydrodynamique (hepia) : Pascal Boivin (professeur HES et responsable) et Marie Fournier (assistante HES)

Volet thermique et climatique (hepia) : Reto Camponovo (professeur HES et responsable), Peter Gallinelli (chargé d'enseignement), Damien Varesano (assistant de recherche), Sylvie Margot (assistante de recherche), Victor Guillot (assistant HES)

Volet hydrologie (heig-vd) : David Consuegra (professeur HES et responsable), Fatimétou N'Gaidé Diouf (collaboratrice scientifique) et Pierre Queloz (collaborateur scientifique)

La biodiversité floristiques des toitures végétalisées du canton de Genève

RAPPORT FINAL DU PROJET TVEG 2014-2016



Genève, le 16 février 2016

Auteurs :

Marianne Hédont, assistante HES

Julie Steffen, assistante de recherche

Dr Patrice Prunier, professeur HES et responsable de la filière gestion de la nature

Résumé

La végétation des dalles et parois rocheuses, comprenant une grande partie de bryophytes, trouve refuge dans les villes, sur des structures d'origine anthropique telles que les toitures végétalisées. Malgré les nombreux inventaires floristiques d'envergure ayant eu lieu ces dernières années dans les principales villes helvétiques (Genève, Lausanne, Zürich...), les toitures, pour des raisons d'accès difficiles, ont souvent été laissées pour compte. Par ailleurs, peu d'études se sont intéressées à la flore de ces biotopes. Ce travail a pour but de caractériser la flore des toitures végétalisées et d'observer les différences de structure et de composition végétale sur des toitures intensives et extensives d'âge différent. Trente toitures végétalisées ont été sélectionnées à Genève sur lesquelles ont été réalisés des inventaires exhaustifs et quantitatifs de plantes vasculaires et de bryophytes. Afin de décrire le couvert végétal et de juger de sa qualité écologique, différents paramètres ont été sélectionnés : le taux de recouvrement, la richesse spécifique, la fréquence des espèces et la proportion d'espèces menacées et de néophytes. Au total, on observe 21 % de la flore vasculaire et 10 % de la bryoflore genevoises sur les toitures. Les relevés permettent d'identifier 35 espèces vasculaires menacées (issues de travaux de végétalisation ou spontanées) dont 1 espèce en danger au niveau national : *Althaea hirsuta* (néophyte européenne) et 3 espèces de haute priorité au niveau cantonal : *Aïra caryophyllea*, *Galium parisiense* et *Geranium sanguineum*. Pour les bryophytes, 7 espèces menacées ont été trouvées dont une, *Pseudocrossidium revolutum* portant un statut menacé d'extinction (CR) à l'échelle nationale. Quatre espèces et 1 sous-espèce sont nouvelles pour le canton : *Bryum creberrimum*, *B. klinggraeffii*, *Mnium spinosum*, *Polytrichum strictum* et *Bryum caespiticium ssp. badium*. Les toitures extensives semblent jouer un rôle plus important en matière de conservation pour les deux groupes d'organismes. Pour les végétaux vasculaires, les toitures intensives présentent des taux de recouvrement et une richesse spécifique plus élevée, alors que les toitures extensives sont favorables au développement des espèces menacées et moins au néophytes invasives. Pour les bryophytes, les toitures extensives sont plus favorables en termes de biodiversité (richesse spécifique et espèces menacées) et de recouvrement, sauf en ce qui concerne la propagation de néophytes. Les toitures de plus de 10 ans sont plus favorables qualitativement ou quantitativement à ces deux groupes de végétaux. En conclusion, ce travail contribue à accroître la connaissance de la végétation des toitures végétalisées et met en évidence leur importance pour la conservation en zone urbaine. Il permettra de proposer des mesures d'amélioration de leur qualité écologique et de les intégrer dans des suivis de la biodiversité.

Table des matières

1. INTRODUCTION	4
2. OBJECTIF.....	4
3. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	4
4. RÉSULTATS - DISCUSSION.....	6
4.1. Analyse du recouvrement végétal	6
4.1.1. Corrélation entre les mesures de recouvrement	6
4.1.2. Variabilité des valeurs de recouvrement	7
4.1.3. Comparaison des taux de recouvrement : toitures intensives vs extensives.....	7
4.1.4. Effet de l'épaisseur de substrat sur le recouvrement	8
4.1.5. Effet de l'âge des toitures sur le recouvrement	9
4.2 Analyse de la flore	10
4.2.1. Flore vasculaire	10
Richesse spécifique	10
Fréquence et dominance	11
Conservation	12
Néophytes invasives	15
Analyses des taxons.....	16
4.2.2. Bryophytes	21
Richesse spécifique	21
Fréquence	22
Conservation	22
Néophytes invasives	24
Valeurs indicatives	24
5. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS	27
6. BIBLIOGRAPHIE	29
Annexe 1 : Liste des plantes vasculaires recensées.....	31
Annexe 2 : Liste des bryophytes recensées.....	40

1. Introduction

Avec le développement de l'urbanisation, un grand nombre de biotopes disparaissent et avec eux la biodiversité qu'ils abritent. Les constructions créées par l'Homme, tels que les toits, offrent des refuges à une partie des espèces. La végétation des dalles et parois rocheuses, comprenant une grande partie de bryophytes y est particulièrement développée. Dans plusieurs cantons de Suisse (Genève, Lausanne, Zürich), des inventaires de la flore vasculaire urbaine, et même parfois de bryophytes et lichens ont été réalisés. Ils mettent en valeur la biodiversité insoupçonnée des villes. Vraisemblablement pour des raisons d'accessibilité difficile (physique, pour accéder aux toitures et administrative, pour l'obtention d'autorisation) ou de non-respect des normes de sécurité, ces études n'ont pas ou très peu intégré les toitures à leurs inventaires. Jusqu'à présent, peu d'études ont porté sur la flore des toitures végétalisées. Pourtant, ces structures, de par leur position surélevée, se situent souvent au carrefour des corridors biologiques et jouent en un sens un rôle prépondérant dans la conservation de espèces comme dans la propagation de néophytes. Pour toutes ces raisons, il est donc essentiel d'évaluer le potentiel de conservation des toitures.

Les bryophytes sont souvent abondantes sur les toitures notamment en raison de la faible concurrence portée par les végétaux vasculaires (Bergamini et al 2001). Il n'est pas rare de trouver sur les toitures à végétalisation spontanée, une strate muscinale importante, voire presque continue. En effet, là où les réserves en nutriments sont trop faibles et où l'épaisseur de substrat ne permet pas aux racines des végétaux vasculaires de se développer, les bryophytes qui ne possèdent pas de vraies racines, trouvent leur niche écologique. Souvent perçues comme nuisibles aux constructions et systématiquement retirées, elles contribuent notamment à l'isolement thermique et à la régulation de l'écoulement de l'eau, comme les végétaux vasculaires (Anthios, 2015). De plus, dépourvues de racines susceptibles d'abimer les constructions, elles limitent leur érosion et contribuent ainsi à leur conservation. Sur les murs « la mousse remplace le mortier tout en laissant le revêtement perméable » (Leuttert et al. 1995). Cette fausse croyance tend progressivement à évoluer puisque des initiatives émergent comme le projet « *Anthios* » à Paris, cherchant à développer des techniques de végétalisation avec des bryophytes ou depuis longtemps déjà, au Japon où la mousse est au contraire favorisée pour son apport esthétique au paysage.

2. Objectif

Ce volet a pour objectif de caractériser la biodiversité floristique (trachéophytes et bryophytes) des toitures végétalisées et ses déterminismes, particulièrement l'influence de la catégorie de toiture (extensive ou intensive) et de son âge (< 10 ans ou > 10 ans). D'autre part, il cherche à évaluer leur potentiel de conservation et leur contribution à l'expansion des espèces invasives. Ces données participeront à la prise de décision pour une mise en valeur des toitures végétalisées.

3. Matériel et méthodes

3.1. Sites d'étude

L'échantillonnage comprend 30 toitures localisées à Genève (Tableaux 1 et 2, Introduction générale), dont 20 toitures dites extensives (10 de moins de 10 ans ; 10 de plus de 10 ans) et 10 toitures dites intensives (5 de moins de 10 ans ; 5 de plus de 10 ans).

3.2. Méthodologie suivie

- Relevés exhaustifs

Des relevés de végétaux vasculaires ont été réalisés sur l'ensemble des toitures aux printemps (mai) et aux automnes (septembre) 2014 et 2015, afin de recenser le maximum de taxons.

Des relevés des bryophytes ont été effectués uniquement en 2014, entre les mois de mai et septembre. Les bryophytes de 18 des 20 toitures dites extensives ont été identifiées en 2014 (sauf les toitures n° 66 et 67 intégrées ultérieurement). Les toitures extensives ont bénéficié d'une pression d'inventaire plus forte que les toitures intensives, élément à prendre en compte dans l'interprétation des résultats.

- Evaluation du taux de recouvrement

Le recouvrement est évalué de manière 1) quantitative et 2) semi-quantitative.

- 1) La méthode quantitative utilisée dite des points quadrats (Daget et Poissonnet 1971) consiste à relever la présence de chaque espèce sur 100 points (en moyenne) le long d'un ou deux transect(s) représentatif(s) de l'ensemble de la surface. Le nombre de contacts obtenus est ensuite pondéré par le nombre total de points du transect afin d'obtenir une « fréquence relative » de chaque espèce par toiture. On attribue arbitrairement une valeur de 0,001 % aux espèces présentes sur la toiture mais n'apparaissant pas sur le transect. En additionnant les fréquences relatives d'une espèce sur l'ensemble des transects on obtient ainsi une « fréquence cumulée » représentant le recouvrement de l'espèce sur l'ensemble des toitures. Pour cette méthode, réalisée aux printemps 2014 et 2015, les bryophytes ne sont pas identifiées, la strate muscinale est ainsi évaluée dans son ensemble.
- 2) La méthode semi-quantitative consiste à assigner à chaque espèce un coefficient d'abondance-dominance (Braun-Blanquet 1928) par rapport à l'ensemble de la surface végétalisée. Cette deuxième méthode est effectuée systématiquement pour les végétaux vasculaires (printemps-automne 2014-2015), alors que pour les bryophytes, seules les toitures extensives en ont bénéficié (2014). Ainsi, dans les analyses de recouvrement qui suivront, seule la première méthode a été prise en compte.

Il n'y a pas eu de relevés quantitatifs réalisés pour les toitures intensives n°6 et n°52 du fait de la disposition de la végétation en patchs. Par ailleurs, un seul transect a été réalisé au printemps 2015 pour les toitures extensives n°66 et n°67 (dû à une intégration décalée dans le projet). De même, un seul transect a été réalisé pour des raisons logistiques d'accès aux toitures pour les numéros : 62 (en 2015) et 8, 34, 53, 61 (en 2014). Pour ces toitures, le coefficient d'abondance-dominance est utilisé et transformé en pourcentage moyen par espèce.

- Paramètres descriptifs

A partir des données récoltées et pour chacune des toitures, est calculé pour les plantes vasculaires et les bryophytes :

- le nombre total d'espèces recensées ;
- le taux de recouvrement par la végétation sur la surface considérée (recouvrement total, recouvrement par les bryophytes, recouvrement par les végétaux vasculaires) ;
- la proportion de taxons menacés et de néophytes invasives ;
- la fréquence des espèces par rapport à un ensemble des toitures est calculée selon leur occurrence ou non par toiture.

Pour les végétaux vasculaires est aussi évalué :

- l'origine et la proportion d'espèces semées ou plantées, spontanées ou indéterminée (plantes vasculaires). Sont considérées comme semées ou plantées les espèces présentes dans les mélanges types commercialisés par UFA et OH-Semences pour toitures ; les espèces d'origine indéterminée étant présentes dans les mélanges pour la végétalisation, mais pouvant aussi apparaître spontanément.
- la proportion de taxons par famille (selon la classification actuelle APG III) ;
- la proportion de taxons par groupe écologique ;
- la proportion de taxons selon le mode de dispersion.

L'épaisseur et la nature du substrat sont évaluées à partir de mesures et d'observations ponctuelles sur chaque toiture, indépendamment des volets hydrologie et analyse de substrat.

Les données ont été saisies et dénombrées sur Microsoft® Office Excel 2013. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Minitab® 17.1.0. Afin d'évaluer l'effet des paramètres écologiques sur les espèces, les tests de Student, Fischer et Kruskal-Wallis ainsi que des analyses de variance (Anova) ont été réalisés. Les coefficients de corrélation de Spearman et de Pearson ont été employés pour les mesures de recouvrement. Selon leur pertinence, les valeurs-test sont indiquées dans le texte entre parenthèses.

4. Résultats - Discussion

4.1. Analyse du recouvrement végétal

Le recouvrement floristique sur les toitures végétalisées est un paramètre facilement appréciable pour les non spécialistes, constituant souvent la première impression en termes d'esthétique.

4.1.1. Corrélation entre les mesures de recouvrement

Nos données ne mettent pas en évidence de corrélation significative pour l'année 2014 entre le recouvrement des bryophytes et celui des trachéophytes (*coefficient de corrélation des rangs de Spearman* = -0,39), par contre, en 2015, les recouvrements sont anti-corrélés de façon significative (*coefficient de corrélation des rangs de Spearman* = -0,49). De nombreuses études confirment cette relation négative en l'attribuant à la compétition pour l'espace et la lumière, mais il est intéressant de relever que quelques autres travaux ont trouvé une corrélation positive entre les deux groupes

d'organismes pouvant être expliquée par la protection contre la sécheresse et l'apport en nutriments que fourniraient les végétaux vasculaires aux bryophytes (Ingerpuu et al 2005).

Les recouvrements par les végétaux vasculaires en 2014 et en 2015 sont fortement corrélés (*coefficient de corrélation de Pearson* $r = 0,92$). Par contre, sur une même toiture, il existe globalement plus de variations des taux de recouvrement par les bryophytes entre les 2 années de relevés. L'enlèvement des mousses lors de l'entretien des toitures d'une année sur l'autre pourrait être un élément d'explication.

4.1.2. Variabilité des valeurs de recouvrement

Nous avons observé une grande variation des valeurs de recouvrement des végétaux vasculaires et des bryophytes sur les toitures de la catégorie extensive principalement en 2014 : de 2 à 87 % de recouvrement pour les bryophytes (figure 1) et de 17 à 90 % pour les végétaux vasculaires (figure 2). Outre la composition floristique, cela peut s'expliquer par d'autres facteurs déterminants variant entre les toitures et parfois sur une même toiture : conditions de mise en place de la végétation, exposition climatique, zones de rétention en eau, qualité et fréquence des entretiens.

4.1.3. Comparaison des taux de recouvrement : toitures intensives vs extensives

Les toitures de la catégorie extensive sont significativement plus recouvertes par les bryophytes en 2014 et 2015 (figure 1) : en moyenne, 48 % sur les toitures extensives contre 26 % sur les toitures intensives (*en 2014 : $T = 2,88$; $p = 0,01$ / en 2015 : $T = 1,99$; $p = 0,081$*).

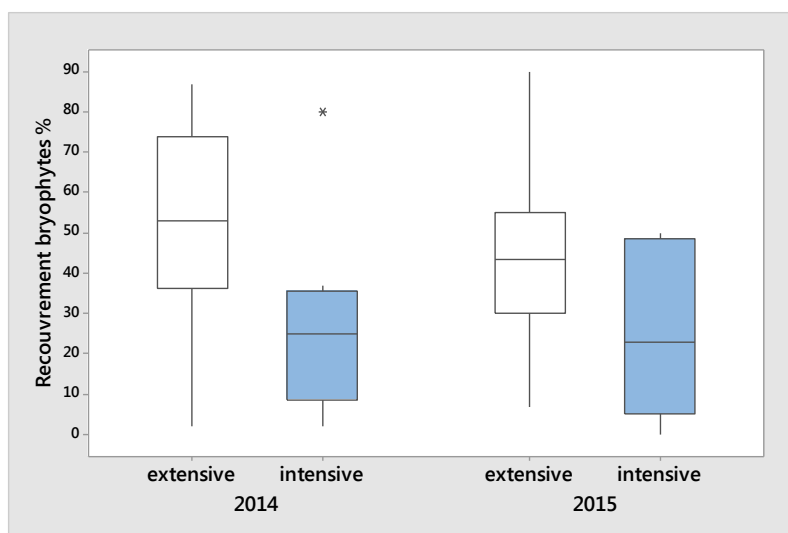


Figure 1 : taux de recouvrement par les bryophytes (2014 / 2015) selon les catégories de toiture

En moyenne, la surface disponible sur les toitures extensives n'est recouverte qu'à moitié par les végétaux vasculaires (figure 2) : 46,2 % en moyenne en 2014 et 53,8 % en 2015. Ce constat n'est pas suffisant selon l'Association suisse des spécialistes du verdissement des édifices (ASVE 1998/2000) qui préconise un recouvrement de 75 % minimum après deux périodes de végétation. Le taux de recouvrement des végétaux vasculaires est significativement supérieur sur les toitures intensives : 30 % de recouvrement en plus sur les toitures intensives (*en 2014 : $T = -4,96$; $p < 0,0001$ / en 2015 : $T = -5,41$; $p < 0,0001$*).

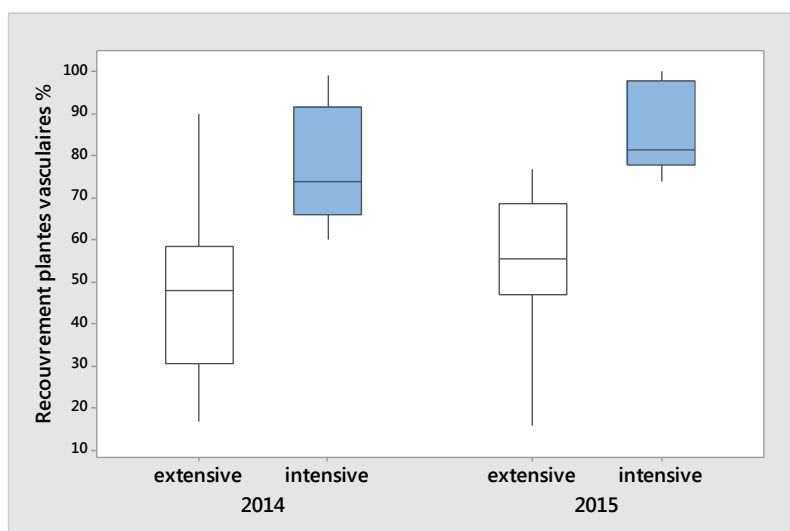


Figure 2 : taux de recouvrement par les végétaux vasculaires (2014 / 2015) selon les catégories de toitures

4.1.4. Effet de l'épaisseur de substrat sur le recouvrement

Sachant qu'au sein de chacune des catégories « extensive » et « intensive », on observe des substrats d'épaisseur et de composition variables, les toitures ont été classées selon 4 classes d'épaisseur du substrat (1. moins de 8 cm, 2. 8-15 cm, 3. plus de 25 cm, 4. épaisseur variable sur la toiture, avec présence de monticules de 10 cm et plus).

En moyenne, les toitures extensives au substrat de moins de 8 cm ont un recouvrement par les plantes vasculaires de 39 % en 2014 et de 47 % en 2015 (figure 3), alors qu'avec une épaisseur de 8-15 cm, il atteint 66,6 % en moyenne en 2014 et 71 % en 2015. Le recouvrement est donc plus élevé lorsque l'épaisseur du substrat augmente. Sont néanmoins à considérer, d'une part l'effectif différent au sein des classes d'épaisseurs de substrat, d'autre part, la nature du substrat à dominance terreuse pour la classe d'épaisseur 2 et strictement de type industriel (pouzzolane) pour la classe 1.

La classe d'épaisseur 3 montre clairement un recouvrement supérieur mais puisqu'elle est strictement liée aux toitures intensives, de composition floristique drastiquement différente des toitures extensives, nous ne pouvons évaluer son effet. De plus, cette classe de substrat étant à dominance terreuse, le taux de matière organique théoriquement plus élevé peut influencer le développement de la flore vasculaire. La catégorie 4, d'épaisseur de substrat variable, présente dans les deux catégories de toiture, sur substrat type industriel (pouzzolane) est associée à des taux de recouvrement intermédiaires, relativement variables.

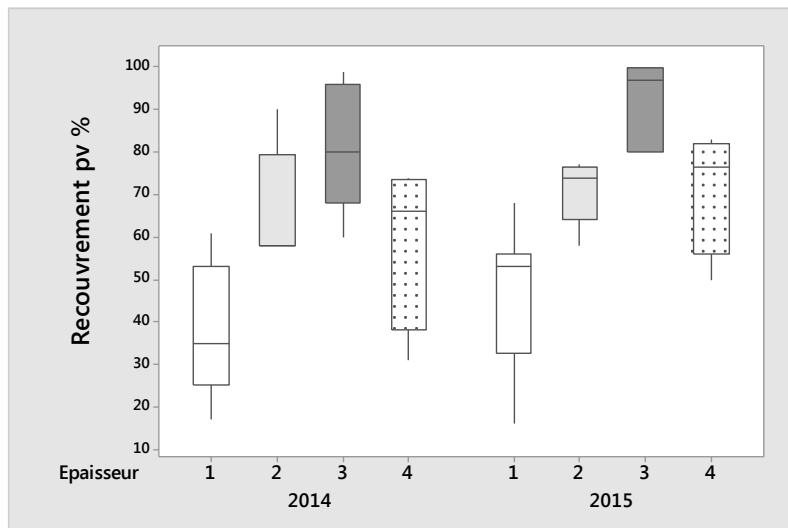


Figure 3 : recouvrement des végétaux vasculaires selon les classes d'épaisseur de substrat

Les bryophytes ont tendance à être moins recouvrantes sur les toitures présentant un substrat de plus de 25 cm (figure 4), mais ces dernières correspondant également à des substrats à dominance terreuse et à la catégorie intensive, il n'est pas possible d'évaluer l'effet réel de ce paramètre.

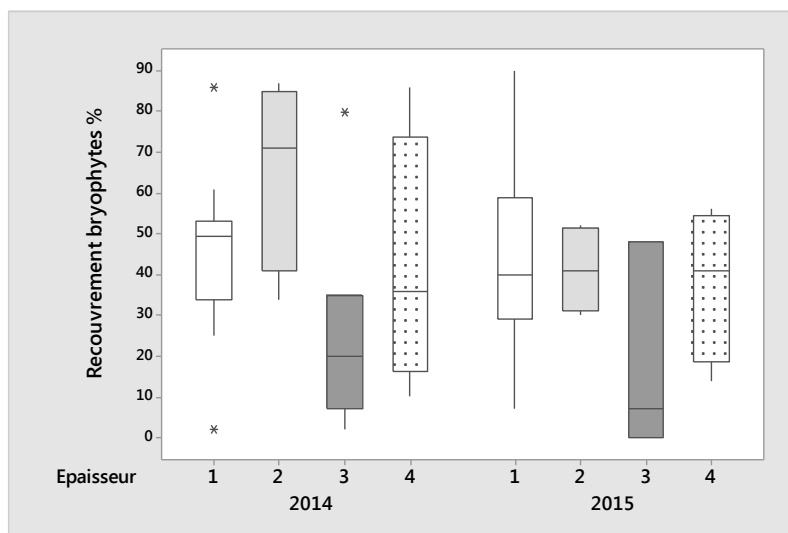


Figure 4: recouvrement des bryophytes selon les classes d'épaisseur de substrat

4.1.5. Effet de l'âge des toitures sur le recouvrement

Pour chacune des catégories de toitures (intensive, extensive), le recouvrement moyen par les végétaux vasculaires sur les toitures de plus de 10 ans est légèrement supérieur (10 à 13 %). Pour les bryophytes, l'âge des toitures ne semble pas influencer le taux de recouvrement. Dans les deux cas, l'effet « âge » sur le recouvrement n'est pas significatif, que ce soit pour les bryophytes ou les végétaux vasculaires (*tests t ; $p > 0,1$*).

4.2 Analyse de la flore

4.2.1. Flore vasculaire

Richesse spécifique

Au total, 298 taxons sont recensés (annexe 1) toutes origines confondues (plantée, spontanée, indéterminée) ce qui représente 21 % de la flore genevoise (par rapport au total de flore actuelle, Lambelet-Haueter et al 2006). Sur les toitures extensives, 198 taxons ont été recensés contre 213 taxons sur les toitures intensives.

En moyenne, 36 taxons vasculaires sont recensés sur les toitures de la catégorie extensive contre 42,7 sur celle de la catégorie intensive. Nos données ne montrent pas d'effet « catégorie » sur la richesse spécifique vasculaire ($T = -1,54$; $p = 0,142$). De même, nous n'obtenons pas d'effet « âge » sur la richesse spécifique vasculaire observée ($T = 0,87$; $p = 0,399$).

Parmi les toitures intensives, 2 toitures de moins de 10 ans de type « mixte », c'est-à-dire comportant une forte épaisseur de substrat, mais de type industriel (n° 33 et 33 bis) présentent la diversité la plus importante : 58 et 64 taxons avec environ 50 % de taxons d'origine spontanée. Toutefois, les 2 autres toitures de ce type, présentant des surépaisseurs de substrat (n° 11 et 62) n'accueillent pas un nombre d'espèces équivalent. D'autres facteurs comme la mise en œuvre de la végétalisation, l'entretien ou l'environnement proche peuvent expliquer cette diversité plus importante sur les toits 33 et 33 bis. Par ailleurs, au sein de cette même catégorie, les 3 toitures de type gazon ou prairie grasse (n° 8, 60, 61) présentent un nombre d'espèces parmi les plus faibles (33 et 29).

Un effort particulier a été mis sur la détermination des espèces appartenant au genre *Festuca*. Ce dernier est souvent mal connu en raison des difficultés de déterminations nécessitant la plupart du temps des coupes transversales des feuilles (figure 5). Dans les listes d'espèces prévues pour la végétalisation ce ne sont souvent pas les espèces qui sont citées, mais l'agrégat tel que par exemple *Festuca ovina* aggr. ou *F. rubra* aggr. Dans une optique de conservation et de végétalisation locale, il était donc nécessaire de d'approfondir cette question. Parmi les 7 espèces identifiées : *Festuca arundinacea*, *F. gautieri*, *F. heteromalla*, *F. marginata* ssp. *gallica*, *F. pratensis*, *F. rubra* s. str. et *F. stricta* ssp. *trachyphylla* ; 4 sont rattachées à une origine anthropique, 3 indéterminée.



Figure 5: coupe transversale de feuille de *Festuca stricta* ssp. *trachyphylla* © M. Hédont

Fréquence et dominance

- Plantes vasculaires

Bien que les deux catégories de toitures présentent le même niveau de richesse spécifique, les profils de fréquence diffèrent entre les deux catégories de toitures.

Sur les toitures extensives, les 4 taxons les plus fréquents (présents sur plus de 75 % des toitures) sont :

- *Petrorhagia saxifraga*, avec un statut de menace EN à Genève, présent dans les mélanges standards utilisés pour la végétalisation des toits ;
- deux taxons d'origine spontanée : *Erigeron annuus s. str.* (néophyte invasive) et *Lactuca serriola* ;
- *Sedum album*, d'origine indéterminée, potentiellement spontanée mais présent également dans les listes de végétaux vendus pour la végétalisation des toits.

Parmi les taxons les plus abondants en termes de recouvrement sur les toitures extensives (tableau 1) figurent essentiellement des espèces présentes dans les mélanges d'origine : *Petrorhagia saxifraga*, *Sedum album*, *Sedum floriferum*, *Sedum hybridum*, *Sedum sexangulare*, sauf *Vulpia myuros* est d'origine spontanée.

Tableau 1 : les 20 taxons les plus abondants en terme de recouvrement (fréquence cumulée) sur les toitures extensives

	Origine	STATUT_ CH	STATUT_ GE	Fréquence cumulée	Occurrence toitures ext. %
<i>Petrorhagia saxifraga</i>	P	LC	EN	1,168	80
<i>Sedum sexangulare</i>	P	LC	LC	1,011	70
<i>Vulpia myuros</i>	S	NT	LC	1,010	60
<i>Sedum hybridum</i>	P			1,008	65
<i>Sedum floriferum</i>	P			1,006	45
<i>Sedum album</i>	I	LC	LC	0,994	75
<i>Silene nutans</i>	P	LC	VU	0,670	50
<i>Festuca stricta ssp trachyphylla</i>	P	---	DD	0,655	15
<i>Sedum rupestre aggr.</i>	P	LC	LC	0,592	55
<i>Festuca marginata ssp gallica</i>	I			0,540	5
<i>Plantago lanceolata</i>	I	LC	LC	0,392	35
<i>Potentilla argentea</i>	P	LC	VU	0,376	50
<i>Festuca rubra aggr.</i>	P	LC	LC	0,373	35
<i>Thymus serpyllum aggr.</i>	P			0,303	15
<i>Thymus pulegioides</i>	P	LC	LC	0,288	40
<i>Sanguisorba minor ssp polygama</i>	P	LC	LC	0,283	50
<i>Echium vulgare</i>	P	LC	LC	0,270	45
<i>Salvia pratensis</i>	P	LC	LC	0,268	25
<i>Medicago lupulina</i>	I	LC	LC	0,256	60
<i>Erigeron annuus s. str.</i>	S (Ni)	---	LC	0,244	90

Sur les toitures intensives inventoriées, les taxons les plus fréquents, présents sur plus de 75 % des toitures, sont associés aux prairies grasses et d'origine spontanée (tout ou en partie) : *Taraxacum officinalis*, *Trifolium repens*, *Medicago lupulina*. Ce dernier est aussi compté parmi les espèces les plus recouvrantes après *Lolium perenne* (tableau 2).

Tableau 2 : les 20 taxons les plus abondants en termes de recouvrement sur les toitures intensives

	Origine	STATUT_ CH	STATUT_ GE	FREQ cumulée	Occurrence toitures ext. %
<i>Lolium perenne</i>	P	LC	LC	2,117	60
<i>Medicago lupulina</i>	I	LC	LC	1,344	80
<i>Equisetum arvense</i>	I	LC	LC	0,642	20
<i>Setaria viridis</i>	S	LC	LC	0,596	10
<i>Festuca heteromala</i>	I	LC	LC	0,527	30
<i>Vicia sativa ssp nigra</i>	S	LC	LC	0,512	40
<i>Trifolium arvense</i>	S	LC	NT	0,504	30
<i>Vulpia myuros</i>	S	NT	LC	0,433	30
<i>Pennisetum alopecuroides</i>	P	---	NE	0,412	10
<i>Sedum floriferum</i>	P			0,389	20
<i>Bromus sterilis</i>	S	LC	LC	0,346	40
<i>Allium schoenoprasum</i>	I	LC	NE	0,308	30
<i>Potentilla reptans</i>	S	LC	LC	0,302	40
<i>Calystegia sepium</i>	S	LC	LC	0,283	20
<i>Spiraea x vanhouttei</i>	P			0,271	20
<i>Hieracium pilosella</i>	P	LC	LC	0,262	30
<i>Poa trivialis s.str.</i>	I	LC	LC	0,252	30
<i>Dianthus carthusianorum</i>	P	LC	NT	0,235	30
<i>Helianthemum nummularium sst</i>	P	LC	CR	0,22	10
<i>Festuca rubra aggr</i>	P	LC	LC	0,211	30

Conservation

Les inventaires ont permis de recenser 35 espèces menacées : 8 espèces menacées au niveau national (Moser et al 2002) et 33 espèces menacées au niveau cantonal (Lambelet-Haueter et al 2006), principalement d'origine spontanée (tableau 3).

Parmi les espèces menacées sur le canton de Genève (figure 6), 11 sont prioritaires, dont 3 avec une priorité très élevée : *Aira caryophyllea* (figure 7), *Galium parisiense*, toutes deux retrouvées sur la même toiture extensive (n°64), de plus de 10 ans et *Geranium sanguineum*, trouvé sur une toiture extensive (n°2), de moins de 10 ans. Au niveau suisse, 1 espèce est en danger, *Althaea hirsuta* (néophyte européenne).

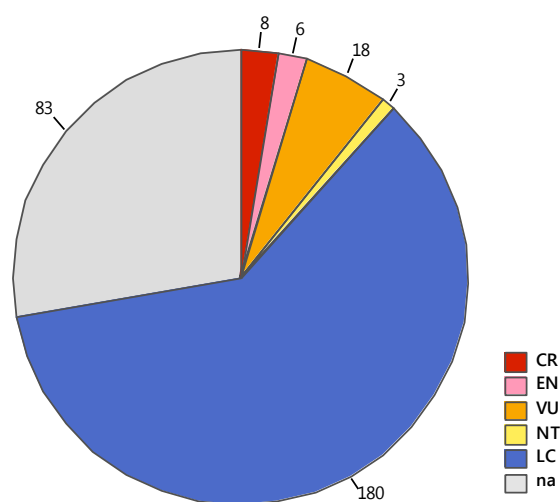


Figure 6 : répartition des espèces vasculaires inventoriées selon leur statut de menace cantonal (GE)



Figure 7 : *Aira caryophyllea* @ botarela.fr

Tableau 3 : taxons vasculaires menacés au niveau national et/ou cantonal (LC : non menacé, NT : quasi menacé, VU : vulnérable, EN : en danger, CR : en danger critique d'extinction, NE : non évalué)

Taxons	Groupe écologique	Origine	STATUT_LR CH	STATUT_LR GE	Priorité genève	Responsabilité Genève	FREQ cumulée TV extensives	Occurrence TV ext %	FREQ cumulée TV intensives	Occurrence TV int %	Néophytes Ge ou Indigènes
<i>Acinos arvensis</i>	S	I	LC	VU			0.001	5	0.001	10	I
<i>Aira caryophyllea</i>	R	S	VU	CR	1		0.001	5	0	0	I
<i>Althaea hirsuta</i>	R	S	[EN]	VU	2		0.012	5	0	0	N
<i>Bromus tectorum</i>	R	S	LC	VU			0.001	5	0	0	N
<i>Calamintha menthifolia</i>	S	S	LC	VU			0.003	15	0	0	N
<i>Calluna vulgaris</i>	F	P	LC	EN			0.000	0	0.161	10	I
<i>Carum carvi</i>	G	S	LC	EN			0	0	0.001	10	I
<i>Cerastium glutinosum</i>	R	S	VU	VU			0.001	5	0	0	N
<i>Cerastium pumilum</i>	R	S	NT	VU			0	0	0.026	10	I
<i>Digitaria ischaenum</i>	R	S	LC	VU			0.001	5	0	0	I
<i>Euphorbia virgata</i>	R,N	S	NT	VU			0.001	5	0	0	N
<i>Gallium parisiense</i>	R	S	EN	CR	1		0.019	5	0	0	I
<i>Geranium sanguineum</i>	F	S	LC	VU	1		0.001	5	0	0	I
<i>Globularia bisnagarica</i>	S	S	LC	EN	5		0.001	5	0	0	I
<i>Gypsophila repens</i>	M	P	LC	CR	4		0.005	25	0	0	N
<i>Helianthemum nummularium sst</i>	S	P	LC	CR	2		0.010	5	0.220	10	I
<i>Koeleria pyramidata</i>	S	P	LC	EN			0.011	5	0	0	I
<i>Medicago arabica</i>	R	S	[CR]	LC			0	0	0.025	20	N
<i>Medicago minima</i>	S	S	LC	VU			0.001	5.000	0	0	I
<i>Orchis morio</i>	S	S	NT	VU			0	0	0.001	10	I
<i>Petrorragia saxifraga</i>	S	P	LC	EN	5		1.168	80	0.021	20	I
<i>Populus nigra sl</i>	na	S	LC	VU			0.007	10	0	0	I
<i>Potentilla argentea</i>	S	P	LC	VU			0.376	50	0	0	I
<i>Potentilla intermedia</i>	R	S	VU	CR			0.001	5	0	0	N
<i>Rorippa palustris</i>	H	S	LC	VU			0.001	5	0	0	I
<i>Sagina apetala ssp erecta</i>	R	S	VU	LC			0	0	0.001	10	I
<i>Sanguisorba officinalis</i>	H	S	LC	VU			0.001	5	0	0	I
<i>Saponaria ocymoides</i>	S	I	LC	VU			0.012	15	0.001	10	I
<i>Silene nutans</i>	S	P	LC	VU			0.670	50	0.007	20	I
<i>Spiranthes spiralis</i>	S	S	NT	CR			0.001	5	0	0	I
<i>Teucrium botrys</i>	S	S	NT	CR	2		0.025	20	0.080	10	I
<i>Thymus praecox s. str.</i>	S	P	LC	CR	4	2	0	0	0.001	10	I
<i>Trifolium aureum</i>	S	S	NT	VU			0.001	5	0	0	I
<i>Trifolium hybridum sp. elegans</i>	R,N	S	{VU}	NE			0	0	0.001	10	N
<i>Valeriana dioica</i>	H	S	LC	EN	5		0	0	0.001	10	I

- Valeurs de conservation des toitures extensives

Sur les toitures extensives, 29 taxons menacés sur le canton de Genève (15 % du recensement sur toitures extensives) ont été recensés et 16 (8 % du recensement sur toitures extensives) à l'échelle du territoire suisse (tableau 4).

Tableau 4 : répartition des taxons menacés sur les toitures extensives d'après leur statut

	Liste rouge CH (nb)	Liste rouge Ge (nb)
CR	0	7
EN	2	3
VU	3	16
NT	11	3
Total nb	16	29
Total %	8	15

- Valeurs de conservation des toitures intensives

Les toitures intensives abritent moins de taxons menacés que les toitures extensives. Au total, 14 taxons menacés sur le canton Genève (7 % du recensement sur toitures intensives) ont été identifiés et 11 au niveau suisse (5 % du recensement sur toitures intensives) (tableau 5). Sur l'ensemble des toitures, aucune espèce ne possède le degré de menace CR au niveau suisse.

Tableau 5 : répartition des taxons menacés sur les toitures intensives d'après leur statut

	Liste rouge CH (nb)	Liste rouge Ge (nb)
CR	0	3
EN	0	4
VU	1	5
NT	10	2
Total nb	11	14
Total (%)	5	7

Néophytes invasives

Les 7 espèces végétales vasculaires considérées invasives (Info Flora 2014) sont listées dans le tableau 6 ci-dessous.

Les 2 espèces les plus fréquentes, *Erigeron annuus* et *Sedum spurium*, sont présentes sur les 2 catégories de toiture. Les autres espèces ont été identifiées uniquement sur 1 ou 2 toiture(s) de la catégorie intensive ; à noter que *Sedum spurium* et *Prunus laurocerasus* sont des espèces plantées lors de la végétalisation des toitures.

Tableau 6 : liste des espèces vasculaires invasives identifiées sur les toitures

Taxon	Famille	Type	Statut	Toiture extensive		Toiture intensive	
				Fréquence cumulée	Occurrence (% des sites)	Fréquence cumulée	Occurrence (% des sites)
<i>Erigeron annuus</i> s.str.	Asteraceae	Herbacé	Black List	0.24	90	0.12	60
<i>Sedum spurium</i>	Crassulaceae	Herbacé	Watch List	0.18	65	0.03	30
<i>Ailanthus altissima</i>	Simaroubaceae	Ligneux	Black List	0	0	0.03	20
<i>Prunus laurocerasus</i>	Rosaceae	Ligneux	Black List	0	0	0.05	20
<i>Rhus typhina</i>	Anacardiaceae	Ligneux	Black List	0	0	<0,01	20
<i>Senecio inaequidens</i>	Asteraceae	Herbacé	Black List	0	0	<0,01	10
<i>Solidago canadensis</i>	Asteraceae	Herbacé	Black List	0	0	<0,01	10
<i>Solidago gigantea</i>	Asteraceae	Herbacé	Black List	0	0	<0,01	10

Analyses des taxons

- Analyse des taxons selon leur origine

Environ 50-55 % des taxons présents sur les toitures extensives ou intensives sont d'origine spontanée, 30-35 % sont implantés et 15 % sont d'origine indéterminée (figures 8-9). Les espèces spontanées sont pour la plupart du temps peu fréquentes sur l'ensemble des toitures inventoriées (5-25 %).

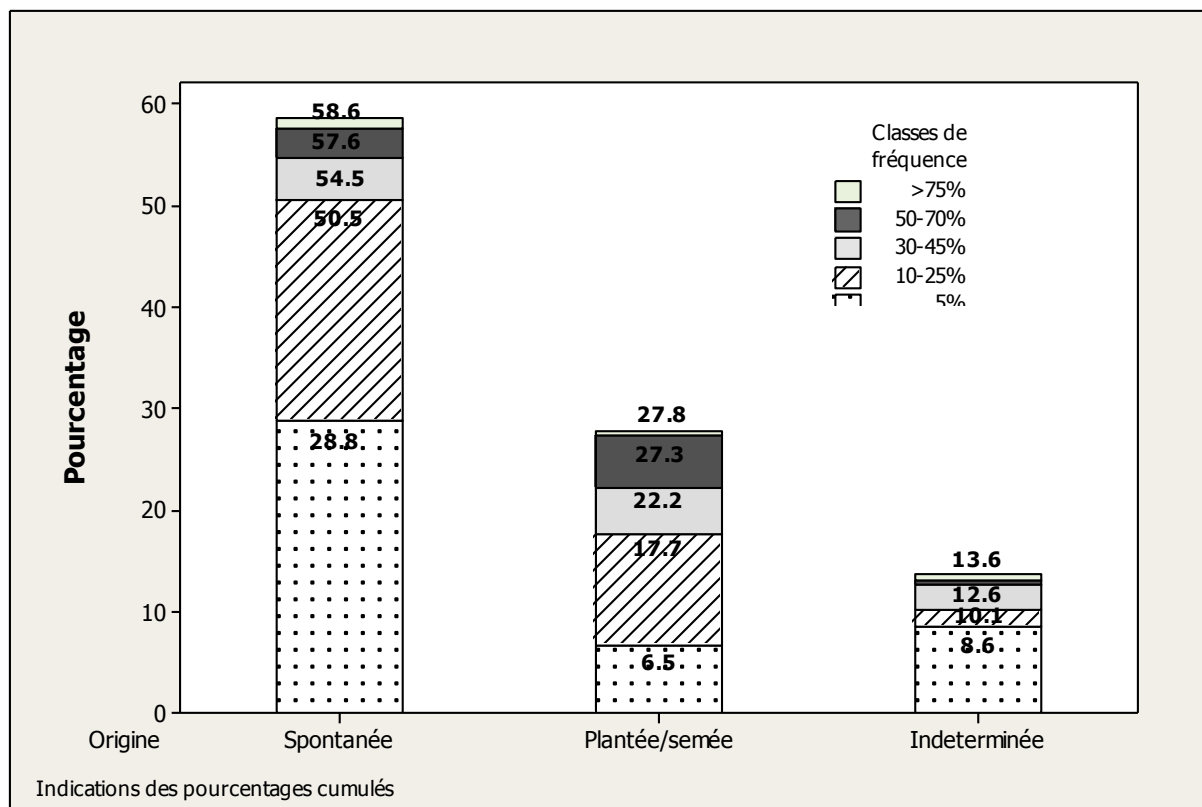


Figure 8 : dénombrement des taxons sur les toitures extensives selon l'origine

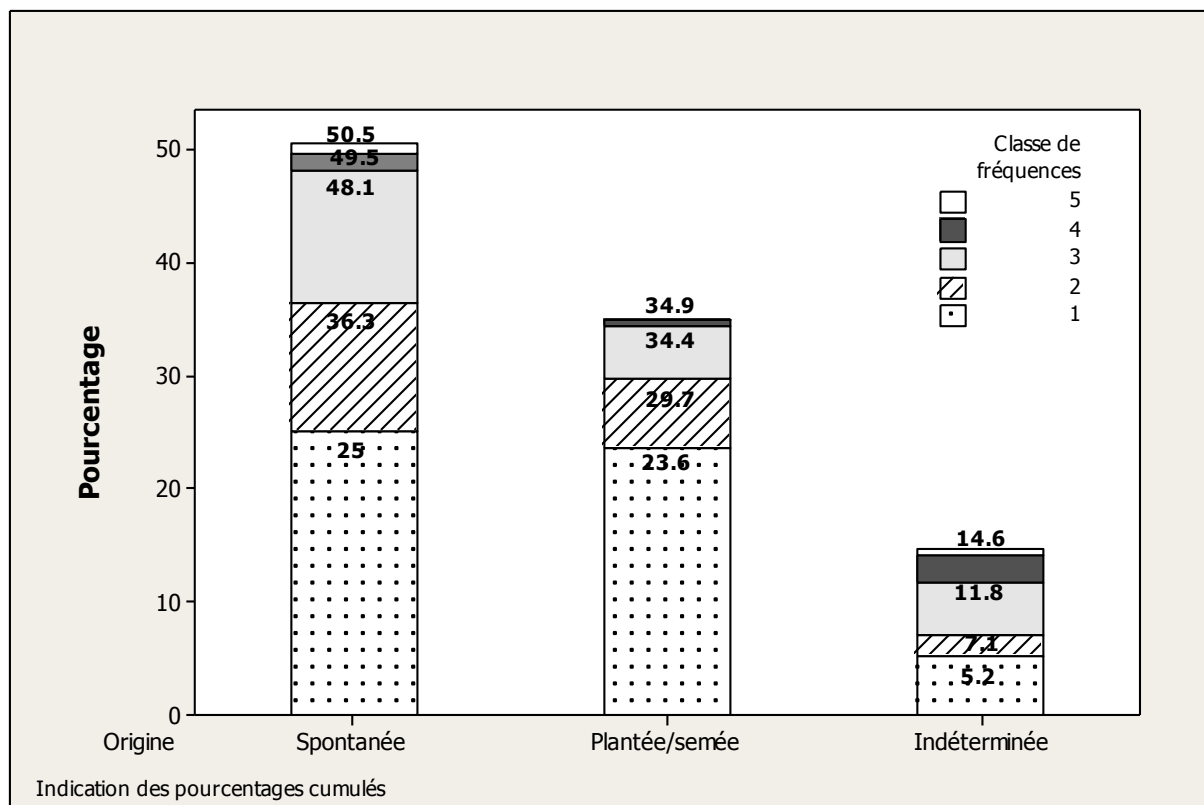


Figure 9 : dénombrement des taxons sur les toitures intensives selon l'origine (classe de fréquence : 1 = 5 % ; 2 = 10-25 % ; 3 = 20-45 % ; 4 = 50 – 70 % ; 5 > 75 %)

- Analyse des taxons selon les groupes écologiques

Sur les toitures extensives, 8 groupes écologiques sont représentés, alors que sur les toitures intensives seul le groupe des plantes de montagne fait défaut. Dans les deux catégories, les plantes rudérales dominent (30-35 %), toutes origines confondues (Lauber & Wagner 2012) (figures 10-11).

Les taxons issus de la végétalisation sont principalement issus du groupe des plantes de prairies maigres (12,6 %) pour les toitures extensives et des plantes cultivées (15,5 %) pour les intensives. Les taxons supposés d'origine spontanée sont en majorité rudéraux (27-31%) pour les deux catégories de toitures. Il s'agit en effet d'une flore des lieux incultes, chemins ou fossés que l'on retrouve plus largement en milieu urbain. Sur les toitures intensives dont le substrat est composé de terre végétale, on retrouve spécifiquement les espèces spontanées des parcs et jardins (liseron, lierre, véronique de Perse, pâturins commun et des prés...).

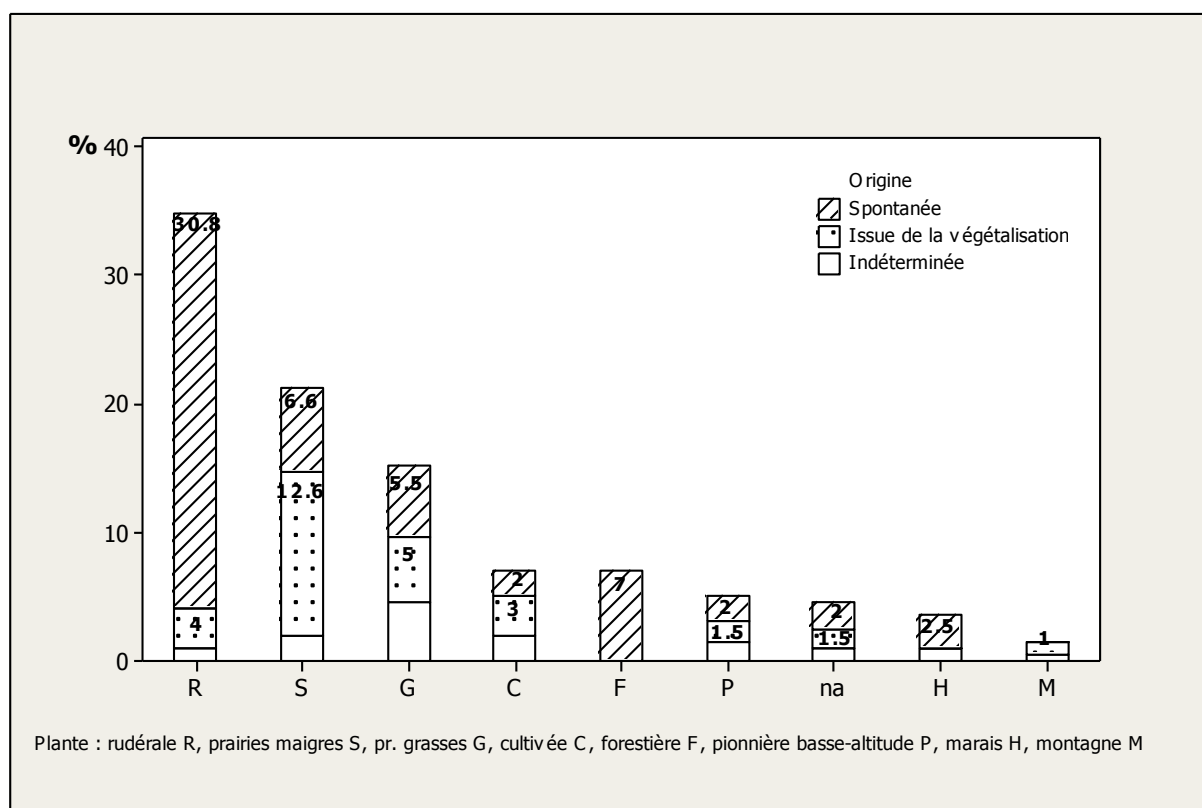


Figure 10 : groupe écologique et origine des taxons recensés sur toitures extensives

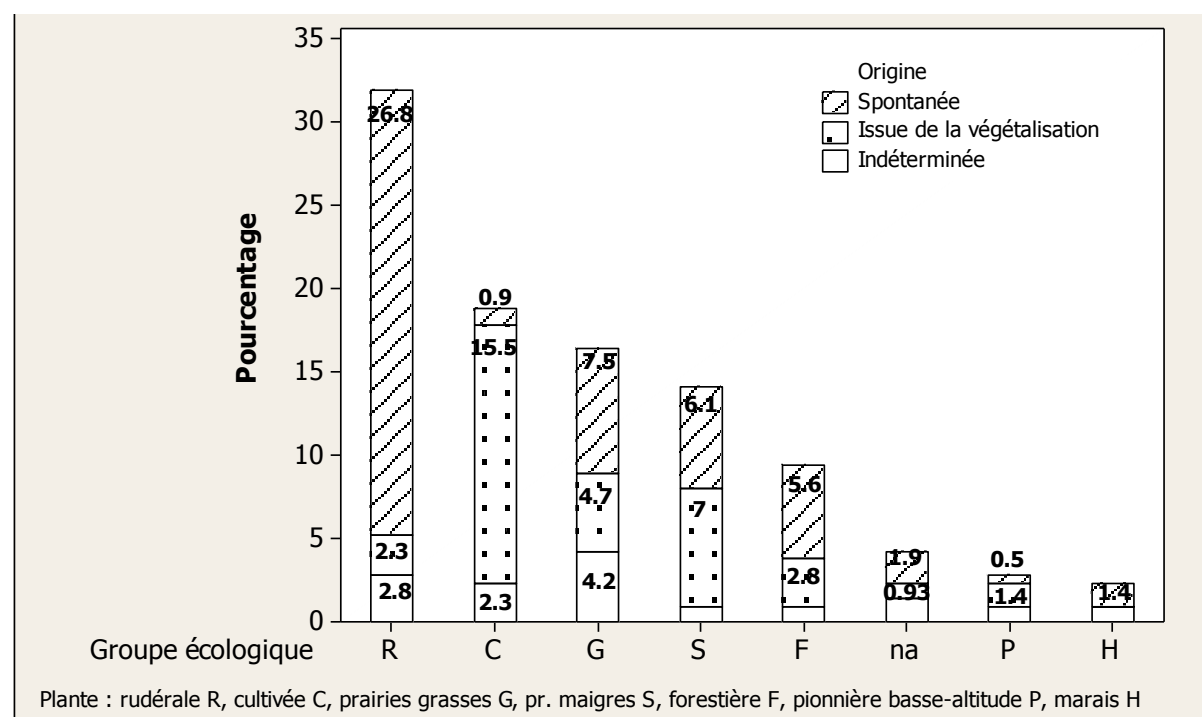


Figure 11 : groupe écologique et origine des taxons recensés sur toitures intensives

- Analyse des taxons par famille

Les taxons recensés sont issus de 40 familles sur les toitures extensives et de 54 familles pour les toitures intensives.

Les taxons recensés sur les toitures extensives et intensives, analysés séparément, sont issus principalement des même familles : poacées (≈ 30 taxons), astéracées (≈ 25), fabacées (15-20) et caryophyllacées (15-20).

Pour les deux catégories de toitures, les taxons issus de la végétalisation appartiennent principalement aux familles des poacées, crassulacées, caryophyllacées et fabacées alors que les taxons spontanés appartiennent surtout aux astéracées, fabacées et poacées (figures 12-13). Mais en termes de recouvrement des plantes issues de la végétalisation ce sont les crassulacées qui dominent pour les toitures extensives (80 %), suivi de poacées et des caryophyllacées. Pour les toitures intensives, ce sont les poacées qui dominent comme pour le nombre de taxons.

Les familles de taxons spontanés dominant en terme de recouvrement sont identiques pour les 2 catégories de toitures : astéracées, fabacées et poacées.

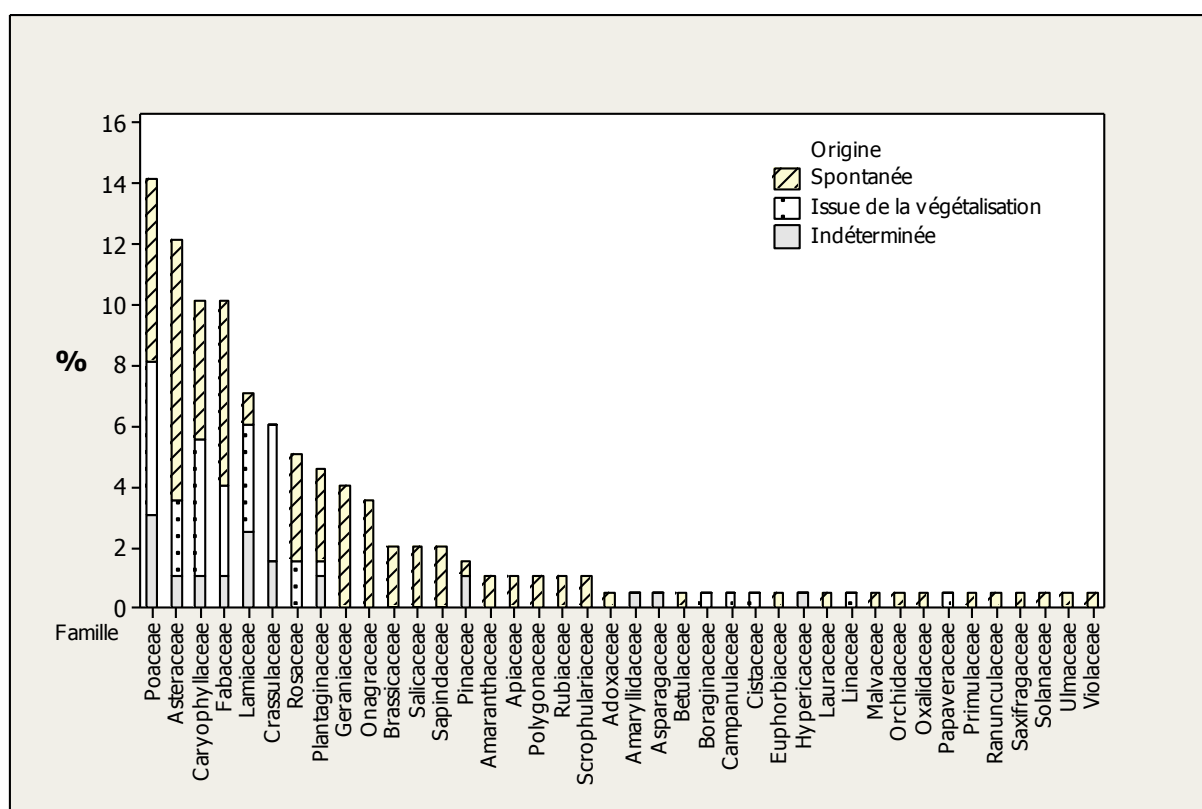


Figure 12 : répartition par famille des taxons recensés sur toitures extensives

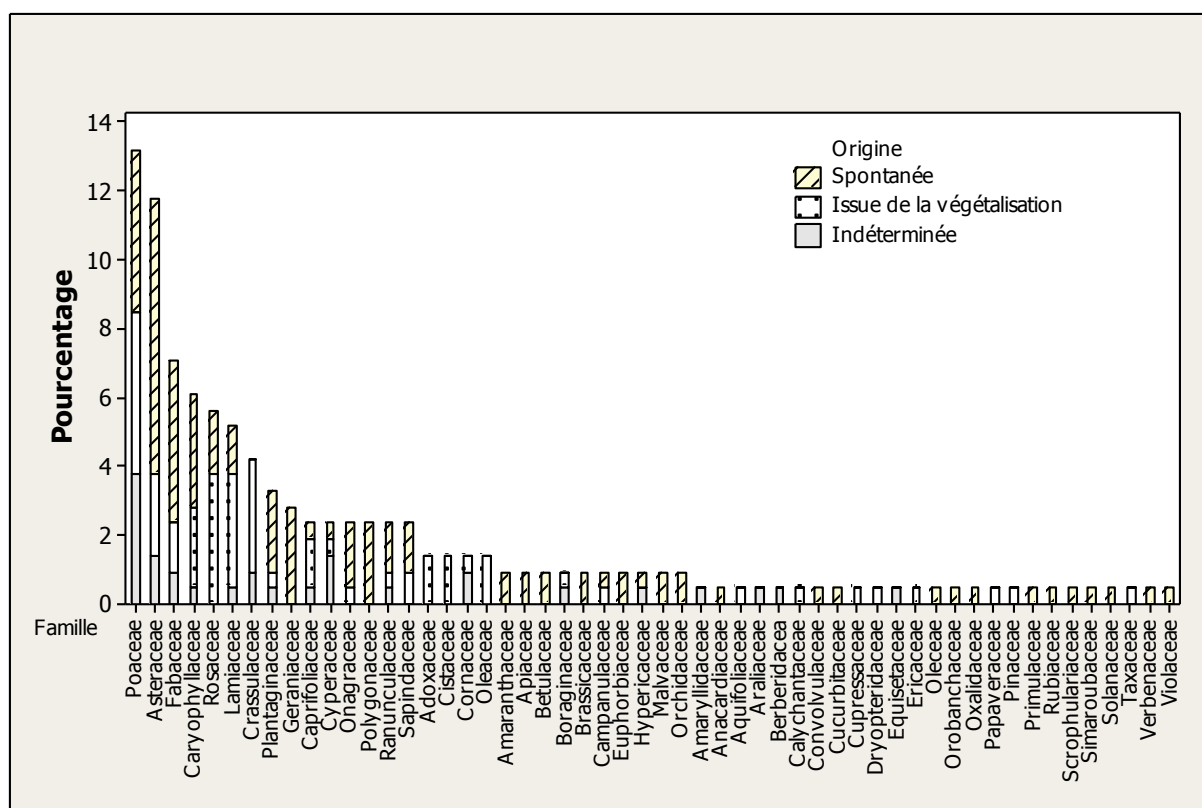


Figure 13 : répartition par famille des taxons recensés sur les toitures intensives

- Analyse des taxons selon leur mode de dispersion

Parmi l'ensemble des taxons recensés, 42 % sont pollinisés par les insectes. Seulement 5 % des taxons sont à multiplication strictement végétative (tableau 7). Ainsi, la diversité floristique de toitures est étroitement liée à la biodiversité entomologique. Cette observation est à considérer en vue de la mise en place de mesures favorables aux insectes pollinisateurs.

La dispersion des graines se fait principalement par le vent (anémochorie) et les animaux (zoochorie) (tableau 8). On observe la même tendance pour les taxons spontanés se dispersant sur les toitures.

Tableau 7 : analyse des taxons selon le mode de reproduction (Landolt 2010)

	ensemble des taxons (298) %	taxons spontanés (167) %
strictement autogames	8	14
uniquement par les insectes	42	33
autogames + insectes	20	23
seulement par le vent	17	14
autogames + vent	4	5
vent + insectes	3	3
multiplication strictement végétative	5	4

Tableau 8 : analyse des taxons selon le mode de dissémination des graines (Landolt 2010)

	autochorie		anemochorie		anthropochorie		zoochorie		hydrochorie	
	total	spontané	total	spontané	total	spontané	total	spontané	total	spontané
autochorie	6	5	0	0	1	0	10	10	0	0
anemochorie	0	0	82	49	20	5	67	38	2	0
anthropochorie	1	0	20	5	1	0	3	6	0	0
zoochorie	10	10	67	38	3	6	77	47	1	1
hydrochorie	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
total	17	15	169	92	25	11	158	102	3	1

4.2.2. Bryophytes

Richesse spécifique

Au total, 38 taxons ont été identifiés sur les toitures (annexe 2), représentant 10 % de la bryoflore de Genève (Burgisser & Cailliau 2012). Sur les 20 toitures extensives inventoriées, 33 bryophytes sont recensées appartenant toutes à l'embranchement des mousses. Sur les 8 toitures intensives, 12 espèces sont inventoriées dont 1 hépatique, *Marchantia polymorpha*. Parmi elles, 5 espèces ont été trouvées uniquement sur ce type de toiture. Elles semblent plus liées au hasard de l'échantillonnage des toitures qu'à des conditions écologiques particulières liées aux catégories de toitures (strate arbustive, substrat humifère sur toitures intensive). A l'image du recouvrement, nous observons un nombre d'espèces significativement plus important sur les toitures de la catégorie extensive ($T = 9,19$; $p < 0.001$), mais rappelons que les toitures extensives ont bénéficié d'une pression d'inventaire plus forte (figure 14). En moyenne, 8,7 espèces sont présentes sur les toitures extensives contre 2,2 espèces sur les intensives. Par ailleurs, l'effet de l'âge sur les toitures extensives est significatif. Les toitures extensives de plus de 10 ans comptabilisent en moyenne 10 espèces de bryophytes contre 7,5 pour les celles de moins de 10 ans ($T = -2,35$, $p = 0,035$).

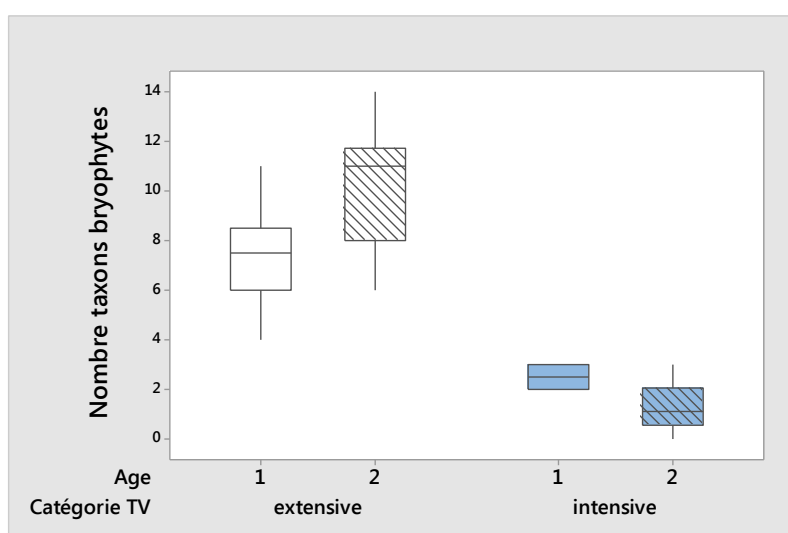


Figure 14 : variabilité de la richesse spécifique bryophytiques

Fréquence

Parmi les espèces apparaissant sur plus d'un tiers de l'ensemble des toitures extensives (tableau 9), toutes possèdent un statut non menacé au niveau suisse et genevois, à l'exception de *Bryum creberrimum*, nouvelle pour le canton, ayant été relevée sur 11 des 18 toitures extensives. On relève également la présence indésirable de *Campylopus introflexus*, néophyte invasive. Il n'est pas surprenant de trouver, *Hypnum cupressiforme* et *Brachythecium rutabulum*, principalement associées aux forêts, mais présentes dans de nombreux autres milieux, comptant parmi les bryophytes les plus fréquentes en Suisse (NISM, 2015).

Tableau 9 : bryophytes les plus fréquentes sur les toitures extensives (Ext. 1 : toitures extensives < 10 ans ; Ext. 2 : toitures extensives > 10 ans ; Ext : Ext.1 + Ext.2)

	Fréq. Ext1 %	Fréq. Ext2 %	Fréq. Ext %
<i>Ceratodon purpureus</i> (Hedw.) Brid. subsp. <i>purpureus</i>	100	87.5	94.4
<i>Tortella inclinata</i> (Hedw. f.) Limpr.	60	75	66.7
<i>Bryum creberrimum</i> Taylor	60	75	66.7
<i>Brachythecium rutabulum</i> (Hedw.) Schimp.	60	62.5	61.1
<i>Bryum argenteum</i> Hedw.	80	37.5	61.1
<i>Hypnum cupressiforme</i> Hedw.	40	87.5	61.1
<i>Bryum capillare</i> Hedw.	70	37.5	55.6
<i>Campylopus introflexus</i> (Hedw.) Brid.	40	62.5	50.0
<i>Barbula unguiculata</i> Hedw.	60	12.5	38.9
<i>Syntrichia ruralis</i> (Hedw.) Web. & Mohr	20	62.5	38.9

Sur les toitures intensives, 3 espèces portant le statut non menacé apparaissent sur plus d'un tiers d'entre elles (tableau 10). Seule *Calliergonella cuspidata*, ayant été trouvée sur les deux catégories de toitures, ne figure pas parmi les espèces fréquentes sur les toitures extensives.

Tableau 10 : bryophytes les plus fréquentes sur les toitures intensives

	Fréq sur toitures intensives .%
<i>Brachythecium rutabulum</i> (Hedw.) Schimp.	55.6
<i>Calliergonella cuspidata</i> (Hedw.) Loeske	33.3
<i>Ceratodon purpureus</i> (Hedw.) Brid. subsp. <i>purpureus</i>	33.3

Conservation

Cinq espèces menacées à Genève (Burgisser & Cailliau 2012) sont identifiées dont une, *Pseudocrossidium revolutum*, en danger critique d'extinction (CR) au niveau suisse (Schnyder et al 2004) et deux espèces régionalement éteintes (RE) à Genève, *Weissia longifolia* et *Aulacomnium palustre*. La majorité sont présentes sur les toitures extensives de plus de 10 ans (tableau 11).

Tableau 11: occurrence des bryophytes menacées ou potentiellement menacées sur les toitures

	Statut LR Ge	Statut LR CH	Occurrence toit. Ext. <10ans	Occurrence toit. Ext. >10ans	Occurrence toit. Int. <10ans	Occurrence toit. Int. >10ans
<i>Aulacomnium palustre</i> (Hedw.) <i>Schwägr.</i>	RE	LC		1		
<i>Plagiopus oederianus</i> (Sw.) H.A.Crum & L.E.Anderson	CR	LC		1		
<i>Pseudocrossidium revolutum</i> (Brid.) R.H.Zander	EN	CR		1		
<i>Racomitrium canescens</i> (Hedw.) Brid. <i>subsp. canescens</i>	EN	LC		1	1	
<i>Brachythecium albicans</i> (Hedw.) Schimp.	NT	LC		3		
<i>Weissia longifolia</i> Mitt.	RE	NT			1	
Total occurrence				7	2	

Quatre espèces et une sous-espèce sont nouvelles pour le canton de Genève (tableau 12). Ces dernières ne portent pas de statut de menace au niveau suisse et sont toutes présentes sur des toitures extensives. L'une d'elles, *Polytrichum strictum* est illustrée ci-dessous (figure 15).

Tableau 12 : occurrence des bryophytes nouvelles sur le canton de Genève sur les toitures

	Statut LR Ge	Statut LR CH	Occurrence toit. Ext. < 10 ans	Occurrence toit. Ext. > 10 ans
<i>Bryum caespiticiu</i> <i>subsp. badiu</i> (Brid.) Lindb.	nouveau	DD	2	
<i>Bryum creberrimu</i> Taylor	nouveau	NT	5	6
<i>Bryum klinggraeffii</i> Schimp.	nouveau	LC	2	
<i>Mnium spinosu</i> (Voit) Schwägr.	nouveau	LC		1
<i>Polytrichum strictu</i> Brid.	nouveau	NT	2	2
Total occurrence			11	9



Figure 15 : *Polytrichum strictum* © J. Steffen

Néophytes invasives

Campylopus introflexus, néophyte invasive, est présente sur la moitié des toits extensifs, plus particulièrement sur les toitures de plus de 10 ans (tableau 9). L'espèce n'a pas été trouvée sur toiture intensive. Jusqu'à maintenant, elle n'avait été identifiée que sur 2 sites au Moulin Vert à Genève, où dans l'un d'eux la mousse a été retirée, l'autre fait l'objet d'un suivi (Burgisser & Cailliau 2012).

Valeurs indicatives

Les valeurs indicatives (Landolt et al 2010, modifiées in Swissbryophytes 2015) de l'ensemble des taxons (figure 16) reflètent des conditions écologiques variables. Les espèces présentent des affinités pour une température associée à l'étage montagnard principalement¹, un degré d'ensoleillement essentiellement semi-ombragé à ensoleillé, un degré d'humidité plutôt variable à tendance moyenne, un pH variable, principalement proche de la neutralité et un taux de nutriments très variable. Ces espèces sont principalement pérennes, ce qui correspond au type biologique habituel pour les mousses.

Même si les toitures offrent des conditions plutôt xéro-thermophiles, à l'échelle des mousses, le moindre élément structural tel que la présence de panneaux solaires ou d'une strate herbacée ou arbustive prend toute son importance et influence les conditions microclimatiques. Le mauvais

¹ Ce résultat surprenant est à considérer avec prudence. Ces valeurs sont données à titre indicatif et en cours d'adaptation.

écoulement hydrique de certaines toitures entraînant la stagnation de l'eau est également très influent. Ces structures peuvent ainsi offrir les conditions écologiques requises à un cortège d'espèces aux exigences écologiques divergentes. Deux espèces caractéristiques des bas-marais et tourbières, *Aulacomium palustre*, éteinte à Genève et *Polytrichum strictum*, nouvelle pour le canton, ont même été retrouvées sur les toits. Trois espèces acidophiles sont recensées, *Polytrichum strictum*, *Campylopus introflexus* et *Racomitrium canescens*. Sachant que le substrat employé sur les toitures est plutôt neutro-basique, on peut expliquer leur présence par l'influence d'autres paramètres comme l'eau de pluie ou plus probablement, par le peu de concurrence des trachéophytes sur les bryophytes (toitures extensives), permettant aux espèces d'étendre leur niche écologique.

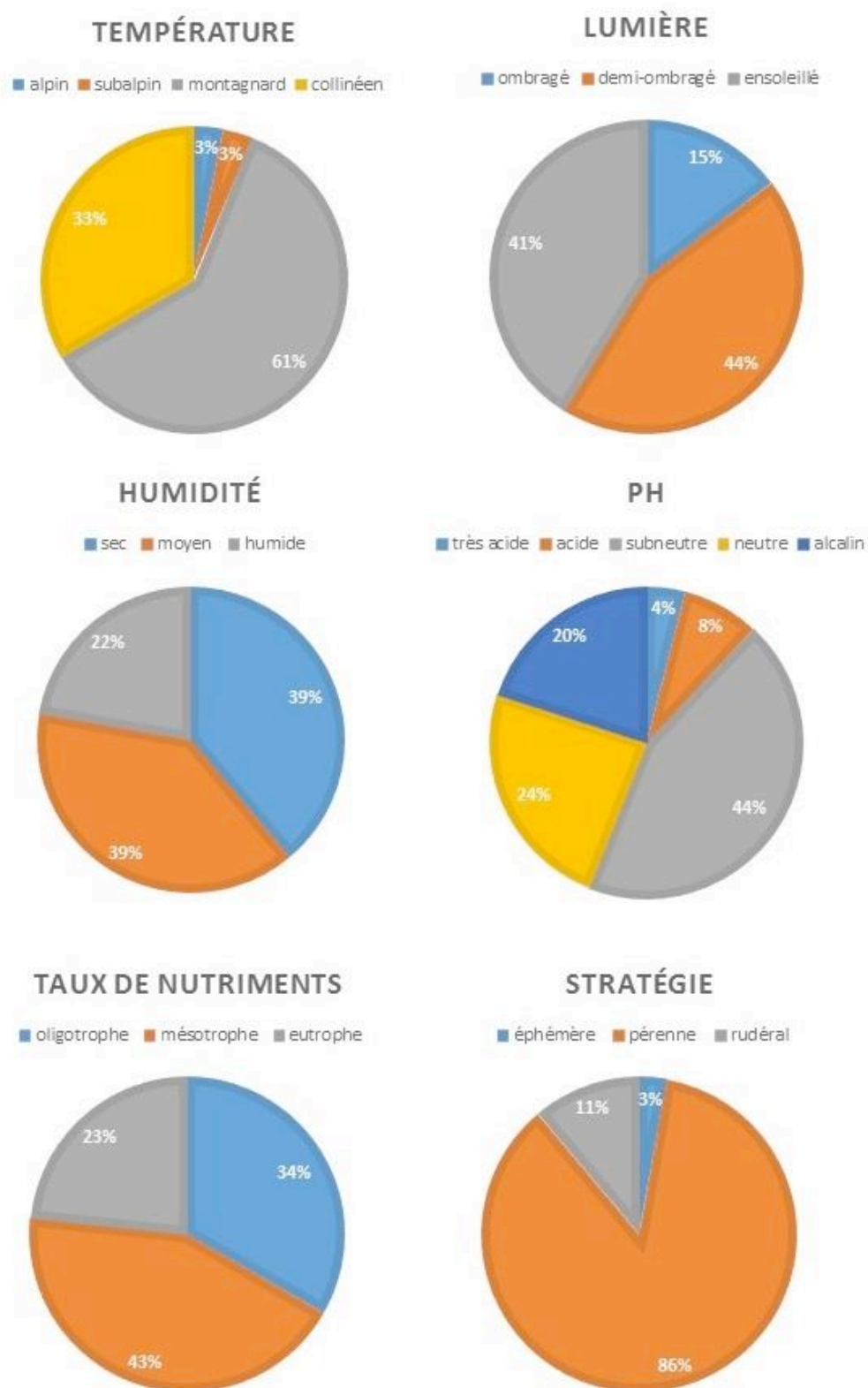


Figure 16: valeurs indicatives de l'ensemble des bryophytes recensées

5. Synthèse et recommandations

Cette analyse de la végétation, réalisée sur 30 toitures urbaines du canton de Genève, dresse un état des lieux de la composition et de la structure de la flore vasculaire et bryophytique.

Le recouvrement des toitures extensives par les végétaux vasculaires (en moyenne 50 %) n'atteint généralement pas les recommandations de l'Association Suisse de Verdissement des Edifices (ASVE, 1998/2000) qui préconise un minimum de 75 % de recouvrement uniforme de la surface après 2 périodes de végétation, sauf si on considère le recouvrement par les mousses. Toutefois, ceci ne peut être perçu comme une mauvaise qualité puisque la baisse de recouvrement de la végétation vasculaire permet l'expression des bryophytes.

La recouvrement relativement important des bryophytes (en moyenne 48 % sur les toitures extensives, 26 % sur les toitures intensives) sur les toitures est un élément positif à favoriser au même titre que la végétation vasculaire. Il est primordial de le spécifier auprès des personnes en charge de l'entretien afin d'enrayer au plus vite ces pratiques destructrices. De plus, il est important de maintenir des toitures non végétalisées sur le long terme car elles contribuent grandement à la conservation des bryophytes.

D'un point de vue qualitatif, on observe 21 % de la flore vasculaire et 10 % de la bryoflore genevoises sur les toitures. Ces inventaires révèlent la contribution des toitures à la biodiversité régionale et leur intérêt pour la conservation en tant que refuge important en milieu urbain. En particulier, avec l'identification de 3 espèces herbacées prioritaires au niveau cantonal, *Aïra caryophyllea*, *Galium parisiense* et *Geranium sanguineum* et de 1 espèce en danger au niveau national, *Althaea hirsuta*. Pour les bryophytes, 1 espèce en danger d'extinction au niveau national, *Pseudocrossidium revolutum* et 4 espèces et 1 sous-espèce nouvellement identifiées sur le canton *Bryum creberrimum*, *B. klinggraeffii*, *Mnium spinosum* et *Polytrichum strictum*. et *Bryum caespitium ssp. badium*.

L'intégration de la gestion des espèces invasives dans les contrats de maintenance des toits devrait permettre d'y limiter leur développement. Cette finalité nécessite une meilleure connaissance des espèces à éliminer afin de mettre en œuvre un entretien adapté au maintien de la diversité floristique (flore protégée, flore envahissante ou invasive). L'installation de communautés indigènes spécifiques pourrait augmenter la valeur de conservation des toits du canton en favorisant un écosystème fonctionnel.

Concernant les différences entre les toitures intensives et extensives, les toitures intensives présentent un taux de recouvrement et une richesse spécifique plus élevée en espèces vasculaires. Les toitures extensives accueillent davantage d'espèces menacées et moins de néophytes invasives. La flore spontanée constitue dans les deux cas environ la moitié des taxons recensés. Pour les bryophytes, les toitures extensives sont favorables en termes de recouvrement, de richesse spécifique et de taxons menacés, sauf en ce qui concerne la propagation de néophytes. Les toitures de plus de 10 ans sont globalement favorables au recouvrement et à la diversité de ces deux groupes végétaux (tableau 13).

La distinction entre les deux catégories de toitures étant conditionnée par l'épaisseur de substrat et en second lieu par sa nature, ce travail constitue une première évaluation de l'influence de ces facteurs

sur la végétation des toitures végétalisées. L'étude de ceux-ci sera approfondie avec d'autres facteurs potentiellement influant comme le niveau hydrique dans une analyse globale de l'ensemble des résultats des différents volets de ce projet.

Tableau 13 : résumé des facteurs observés sur les deux catégories de toitures

Taux de recouvrement	Plantes vasculaires	Bryophytes
selon la catégorie toiture	supérieur sur la cat. intensive	supérieur sur la cat. extensive
selon l'âge des toitures	tendance supérieures sur les toitures > 10 ans	pas d'effet
selon l'épaisseur substrat	tendance positive	tendance négative
Richesse spécifique		
selon la catégorie des toitures	tendance supérieure sur la cat. intensive	tendance supérieure sur la cat. extensive
selon l'âge des toitures	pas d'effet	tendance supérieure sur la cat. extensive > 10 ans
Proportion d'espèces menacées		
selon la catégorie des toitures	tendance supérieure sur la cat. extensive	tendance supérieure sur la cat. extensive
selon l'âge des toitures	-	tendance supérieur sur les ext. > 10 ans
Proportion de néophytes invasives		
selon la catégorie des toitures	tendance supérieure sur les intensives	tendance supérieure sur les extensives
selon l'âge des toitures	-	tendance supérieure sur les > 10 ans

6. Bibliographie

- Association suisse des spécialistes du verdissement des édifices (ASVE) (éd.) 1998/2000. Directives pour la végétalisation extensive des toitures. Partie 1 : capacité hydrique et degré de recouvrement de la végétation, partie 2 : attribution d'un label et écobilan.
- Bergamini A., Pauli D., Peintinger M., Schmid B. 2001. *Relationships between productivity, number of shoots and number of species in bryophytes and vascular plants*. Journal of ecology, 89, 920-929.
- Braun-Blanquet J. 1928. *Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde*. Biologische Studienbücher, 7, Berlin.
- Burgisser L., Cailliau A. 2012. Les mousses : Liste Rouge, inventaire et initiation aux bryophytes du canton de Genève. Conservatoire et Jardin botanique de la ville de Genève. Hors-série n° 14.
- Daget P. et Poissonnet J. 1971. *Une méthode d'analyse phytosociologique des prairies*. Ann. Agron., 22 (1), 5-41.
- Ingerpuu N., Iiira J., Pärtel M. 2005. *Vascular plants facilitat bryophytes in a grassland experiment*. Plant ecology, 180, 69-75.
- Lambelet-Haueter C., Schneider C., Mayor R. 2006. *Inventaire des plantes vasculaires du canton de Genève avec Liste Rouge*. Conservatoire et Jardin botanique de la ville de Genève. Hors-série n° 10.
- Landolt E. 2010. *Flora indicativa : ökologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora der Schweiz und der Alpen*. Bern : Haupt.
- Lauber W., Wagner G. 2012. *Flora Helvetica*. Bern : Haupt.
- Moser D., Gyax A., Bäumler B., Wyler N., Palese R. 2002. *Liste Rouge des fougères et plantes à fleurs menacées de Suisse*. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne.
- Schnyder N., Bergamini A., Hofmann H., Müller N., Schubiger-Bossard C., Urmi E. 2004. Liste Rouge des espèces menacées en Suisse. OFEFP, FUB & NISM.

Sites internet

Anthios

<http://www.anthios.fr>, consulté le 19.2.2016

Botarela

<http://botarela.fr>, consulté le 18.2.2016.

Info Flora. *Liste Noire (état août 2014)*.

<https://www.infoflora.ch>, consulté le 22.2.2016.

Nationales Inventar der Schweizer Moosflora NISM
<http://www.nism.uzh.ch>, consulté le 24.2.2015

Swissbryophytes
<http://www.swissbryophytes.ch>, consulté le 24.2.2016

Annexe 1 : Liste des plantes vasculaires recensées

(en rouge, les néophytes envahissantes)

Taxon	Famille	Type plante	Origine supposée	STATUT_LR CH	STATUT_LR GE	Priorité Ge	Responsabilité Ge	Fréquence cumulée tv extensives	Occurrence % tv ext	Fréquence cumulée tv intensives	Occurrence % tv int
<i>Abelia x grandiflora</i>	Caprifoliaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.050	10
<i>Acer campestre</i>	Sapindaceae	L	S	na	na	-	-	0.002	10	0.001	20
<i>Acer davidii</i>	Sapindaceae	L	P	na	na	-	-	0.000	0	0.001	10
<i>Acer palmatum</i>	Sapindaceae	L	P	na	na	-	-	0.000	0	0.001	10
<i>Acer platanoïdes</i>	Sapindaceae	L	S	LC	LC	-	-	0.010	20	0	0
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Sapindaceae	L	S	LC	LC	-	-	0.002	10	0.001	10
<i>Acer sp.</i>	Sapindaceae	L	S	na	na	-	-	0.014	50	0.002	20
<i>Achillea millefolium</i>	Asteraceae	H	P	LC	LC	-	-	0.174	35	0.001	10
<i>Acinos arvensis</i>	Lamiaceae	H	I	LC	VU	-	-	0.001	5	0.001	10
<i>Agrostis capillaris</i>	Poaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Ailanthus altissima</i>	Simaroubaceae	L	S	NT	LC	-	-	0.000	0	0.032	20
<i>Aira caryophylla</i>	Poaceae	H	S	VU	CR	1	-	0.001	5	0	0
<i>Ajuga genevensis</i>	Lamiaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Ajuga reptans</i>	Lamiaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.000	0	0.002	10
<i>Allium schoenoprassum</i>	Amaryllidaceae	H	I	LC	NE	-	-	0.003	15	0.308	30
<i>Alopecurus pratensis</i>	Poaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Althaea hirsuta</i>	Malvaceae	H	S	EN	VU	2	-	0.012	5	0	0
<i>Amaranthus hypochondriacus</i>	Amaranthaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.002	10	0.001	10
<i>Amelanchier lamarckii</i>	Rosaceae	L	P	na	na	-	-	0.000	0	0.001	10
<i>Anacamptis pyramidalis</i>	Orchidaceae	H	S	NT	LC	-	-	0.000	0	0.001	10
<i>Anagallis arvensis</i>	Primulaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0.002	20
<i>Anthemis tinctoria</i>	Asteraceae	H	P	NT	NE	-	-	0.001	5	0	0
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Poaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.001	5	0.001	10
<i>Anthyllis vulneraria sl</i>	Fabaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.007	10	0	0
<i>Anthyllis vulneraria ssp polyphylla</i>	Fabaceae	H	P	na	na	-	-	0.039	5	0	0
<i>Anthyllis vulneraria ssp carpatica</i>	Fabaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Arabidopsis thaliana</i>	Brassicaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Arenaria leptoclados</i>	Caryophyllaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.002	10	0	0
<i>Arenaria serpyllifolia</i>	Caryophyllaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.087	55	0.006	10
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Poaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.000	0	0.021	20
<i>Aucuba japonica</i>	Cornaceae	L	P	na	na	-	-	0.000	0	0.001	10
<i>Avenella flexuosa</i>	Poaceae	H	S	na	na	-	-	0.000	0	0.102	20
<i>Bellis perennis</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.000	0	0.013	30
<i>Betula pendula</i>	Betulaceae	L	S	na	na	-	-	0.000	0	0.001	10
<i>Bromus carinatus</i>	Poaceae	H	S	---	NE	-	-	0.000	0	0.001	10

Taxon	Famille	Type plante	Origine supposée	STATUT_LR CH	STATUT_LR GE	Priorité Ge	Responsabilité Ge	Fréquence cumulée tv extensives	Occurrence % tv ext	Fréquence cumulée tv intensives	Occurrence % tv int
<i>Bromus erectus</i>	Poaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.001	5	0.001	10
<i>Bromus hordeaceus</i>	Poaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.000	0	0.011	10
<i>Bromus racemosus aggr B.commutat</i>	Poaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.000	0	0.001	10
<i>Bromus sterilis</i>	Poaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.047	20	0.346	40
<i>Bromus tectorum</i>	Poaceae	H	S	LC	VU	-	-	0.001	5	0	0
<i>Bryonia dioica</i>	Cucurbitaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.000	0	0.017	10
<i>Calamintha menthifolia</i>	Lamiaceae	H	S	LC	VU	-	-	0.003	15	0	0
<i>Calluna vulgaris</i>	Ericaceae	L	P	LC	EN	-	-	0.000	0	0.161	10
<i>Calystegia sepium</i>	Convolvulaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.000	0	0.283	20
<i>Campanula rapunculoides</i>	Campanulaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.000	0	0.001	10
<i>Campanula rotundifolia</i>	Campanulaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.002	10	0.002	20
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	Brassicaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.000	0	0.010	10
<i>Cardamine hirsuta</i>	Brassicaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.035	15	0.042	30
<i>Carex divulsa</i>	Cyperaceae	H	S	NT	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Carex hirta</i>	Cyperaceae	H	I	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Carex pendula</i>	Cyperaceae	H	P	LC	LC	-	-	0	0	0.076	10
<i>Carex sp</i>	Cyperaceae	H	I	na	na	-	-	0	0	0.158	10
<i>Carex spicata</i>	Cyperaceae	H	I	LC	LC	-	-	0	0	0.009	20
<i>Carpinus betulus</i>	Betulaceae	L	S	LC	LC	-	-	0.002	10	0.001	10
<i>Carum carvi</i>	Apiaceae	H	S	LC	EN	-	-	0	0	0.001	10
<i>Catapodium rigidum</i>	Poaceae	H	S	NT	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Centaurea jacea</i>	Asteraceae	H	P	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Cerastium fontanum ssp vulgare</i>	Caryophyllaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.004	20	0.004	40
<i>Cerastium glomeratum</i>	Caryophyllaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.041	20	0.002	20
<i>Cerastium glutinosum</i>	Caryophyllaceae	H	S	VU	VU	-	-	0.001	5	0	0
<i>Cerastium pumilum</i>	Caryophyllaceae	H	S	NT	VU	-	-	0	0	0.026	10
<i>Cerastium semidecandrum</i>	Caryophyllaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.031	10	0	0
<i>Cerastium tomentosum</i>	Caryophyllaceae	H	S	DD	NE	-	-	0.001	5	0	0
<i>Chaenorrhinum minus</i>	Plantaginaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Chasmanthium latifolium</i>	Poaceae	H	P	na	na	-	-	0	0	0.135	20
<i>Chenopodium album</i>	Amaranthaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.005	25	0.001	10
<i>Chimonanthus praecox</i>	Calychantaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Cirsium arvense</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.034	20
<i>Cirsium vulgare</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.002	10	0.001	10
<i>Cistus laurifolius</i>	Cistaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.050	10

Taxon	Famille	Type plante	Origine supposée	STATUT_LR CH	STATUT_LR GE	Priorité Ge	Responsabilité Ge	Fréquence cumulée tv extensives	Occurrence % tv ext	Fréquence cumulée tv intensives	Occurrence % tv int
<i>Clematis cultivars</i>	Ranunculaceae	H	P	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Clematis montana</i>	Ranunculaceae	H	I	na	na	-	-	0	0	0.049	20
<i>Conyza canadensis</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.083	35	0.001	10
<i>Cornus sanguinea</i>	Cornaceae	L	I	LC	LC	-	-	0	0	0.175	60
<i>Cornus sp.</i>	Cornaceae	L	I	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Cotoneaster lacteus</i>	Rosaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.002	20
<i>Crepis capillaris</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0.050	10
<i>Cynodon dactylon</i>	Poaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Dactylis glomerata</i>	Poaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.001	5	0.040	10
<i>Daucus carota</i>	Apiaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.008	15	0.023	30
<i>Dianthus armeria</i>	Caryophyllaceae	H	P	NT	LC	-	-	0.001	5	0.001	10
<i>Dianthus carthusianorum</i>	Caryophyllaceae	H	P	LC	NT	-	-	0.051	65	0.235	30
<i>Dianthus carthusianorum ssp. vaginatus</i>	Caryophyllaceae	H	P	na	na	-	-	0.002	5	0	0
<i>Dianthus deltoides</i>	Caryophyllaceae	H	P	NT	NE	-	-	0.002	10	0.001	10
<i>Dianthus sylvestris</i>	Caryophyllaceae	H	P	LC	NE	-	-	0.045	20	0	0
<i>Digitaria ischaenum</i>	Poaceae	H	S	LC	VU	-	-	0.001	5	0	0
<i>Digitaria sanguinalis</i>	Poaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0.004	40
<i>Dryopteris filix-mas</i>	Dryopteridaceae	H	P	LC	LC	-	-	0	0	0.050	10
<i>Duchesnea indica</i>	Rosaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Echium vulgare</i>	Boraginaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.270	45	0.034	40
<i>Elymus repens</i>	Poaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.041	10
<i>Epilobium dodonaei</i>	Onagraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Epilobium hirsutum</i>	Onagraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Epilobium parviflorum</i>	Onagraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.005	25	0.003	30
<i>Epilobium roseum</i>	Onagraceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.069	20
<i>Epilobium sp.</i>	Onagraceae	H	S	na	na	-	-	0.002	10	0.002	20
<i>Epilobium tetragonum</i>	Onagraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.002	10	0.011	20
<i>Equisetum arvense</i>	Equisetaceae	H	I	LC	LC	-	-	0	0	0.642	20
<i>Erigeron acer sstr.</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.030	15	0	0
<i>Erigeron annuus s.str.</i>	Asteraceae	H	S	---	LC	-	-	0.244	90	0.122	60
<i>Erodium ciconium</i>	Geraniaceae	H	S	na	na	-	-	0.004	25	0	0
<i>Erophila verna</i>	Brassicaceae	H	S	na	na	-	-	0.035	15	0	0
<i>Euphorbia helioscopia</i>	Euphorbiaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Euphorbia peplus</i>	Euphorbiaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Euphorbia virgata</i>	Euphorbiaceae	H	S	NT	VU	-	-	0.001	5	0	0

Taxon	Famille	Type plante	Origine supposée	STATUT_LR CH	STATUT_LR GE	Priorité Ge	Responsabilité Ge	Fréquence cumulée tv extensives	Occurrence % tv ext	Fréquence cumulée tv intensives	Occurrence % tv int
<i>Festuca arundinacea</i>	Poaceae	H	I	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Festuca gautieri</i>	Poaceae	H	P	na	na	-	-	0.129	10	0	0
<i>Festuca heteromala</i>	Poaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.001	5	0.527	30
<i>Festuca marginata ssp gallica</i>	Poaceae	H	I	na	na	-	-	0.540	5	0.018	30
<i>Festuca pratensis</i>	Poaceae	H	P	LC	LC	-	-	0	0	0.030	10
<i>Festuca rubra aggr</i>	Poaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.373	35	0.211	30
<i>Festuca rubra sstr</i>	Poaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.002	10	0	0
<i>Festuca stricta ssp trachyphylla</i>	Poaceae	H	P	---	DD	-	-	0.655	15	0	0
<i>Forsythia x intermedia</i>	Oleaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.050	10
<i>Fragaria vesca</i>	Rosaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Fraxinus exelsior</i>	Oleaceae	L	S	LC	LC	-	-	0	0	0.002	20
<i>Galinsoga ciliata</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.004	20	0	0
<i>Gallium parisiense</i>	Rubiaceae	H	S	EN	CR	1	-	0.019	5	0	0
<i>Gallium verum sst</i>	Rubiaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.003	15	0	0
<i>Gaura lindheimeri</i>	Onagraceae	H	P	na	na	-	-	0	0	0.020	10
<i>Genista pilosa</i>	Fabaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.020	10
<i>Geranium columbinum</i>	Geraniaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0.078	20
<i>Geranium dissectum</i>	Geraniaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.002	10	0.109	20
<i>Geranium pusillum</i>	Geraniaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.006	5	0	0
<i>Geranium pyrenaicum</i>	Geraniaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.021	20
<i>Geranium robertianum s.str.</i>	Geraniaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0.011	20
<i>Geranium robertianum sl</i>	Geraniaceae	H	S	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Geranium robertianum ssp purpureum</i>	Geraniaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Geranium rotundifolium</i>	Geraniaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.022	25	0.012	30
<i>Geranium sanguineum</i>	Geraniaceae	H	S	LC	VU	1	-	0.001	5	0	0
<i>Globularia bisnagarica</i>	Plantaginaceae	H	S	LC	EN	5	-	0.001	5	0	0
<i>Globularia nudicaulis</i>	Plantaginaceae	H	I	na	na	-	-	0.001	5	0	0
<i>Gypsophila paniculata</i>	Caryophyllaceae	H	S	NT	NE	-	-	0.001	5	0	0
<i>Gypsophila repens</i>	Caryophyllaceae	H	P	LC	CR	4	-	0.005	25	0	0
<i>Hedera helix</i>	Araliaceae	L	I	LC	LC	-	-	0	0	0.070	30
<i>Helianthemum "Lawrensons's Pink"</i>	Cistaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.050	10
<i>Helianthemum nummularium sst</i>	Cistaceae	L	P	LC	CR	2	-	0.010	5	0.220	10
<i>Helianthus annuus</i>	Asteraceae	H	S	LC	NE	-	-	0.001	5	0	0
<i>Hieracium cymosum</i>	Asteraceae	H	P	na	na	-	-	0.017	10	0.001	10
<i>Hieracium pilosella</i>	Asteraceae	H	P	LC	LC	-	-	0.104	60	0.262	30

Taxon	Famille	Type plante	Origine supposée	STATUT_LR CH	STATUT_LR GE	Priorité Ge	Responsabilité Ge	Fréquence cumulée tv extensives	Occurrence % tv ext	Fréquence cumulée tv intensives	Occurrence % tv int
<i>Holcus lanatus</i>	Poaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.010	30	0.005	50
<i>Hypericum humifusum</i>	Hypericaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Hypericum perforatum</i>	Hypericaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.027	35	0.077	30
<i>Hypochaeris radicata</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.024	50	0.102	40
<i>Ilex crenata</i>	Aquifoliaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Juniperus horizontalis</i>	Cupressaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Knautia arvensis</i>	Caprifoliaceae	H	I	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Koeleria pyramidata</i>	Poaceae	H	P	LC	EN	-	-	0.011	5	0	0
<i>Lactusa serriola</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.026	80	0.037	40
<i>Laurus nobilis</i>	Lauraceae	L	S	NT	NE	-	-	0.001	5	0	0
<i>Lavandula angustifolia</i>	Lamiaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.101	30
<i>Leontodon hispidus</i>	Asteraceae	H	I	LC	LC	-	-	0.007	5	0	0
<i>Leontodon automnalis</i>	Asteraceae	H	I	LC	LC	-	-	0.001	5	0.002	20
<i>Leucanthemum vulgare</i>	Asteraceae	H	P	LC	DD	-	-	0.005	25	0.001	10
<i>Linaria vulgaris</i>	Plantaginaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.046	55	0.033	40
<i>Linum perenne</i>	Linaceae	H	P	---	NE	-	-	0.011	5	0	0
<i>Lolium multiflorum</i>	Poaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.002	10	0	0
<i>Lolium perenne</i>	Poaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.001	5	2.117	60
<i>Lonicera pileata</i>	Caprifoliaceae	L	P	NT	NE	-	-	0	0	0.001	10
<i>Lonicera tatarica</i>	Caprifoliaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Lotus corniculatus</i>	Fabaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.052	10	0.060	10
<i>Mahonia aquifolium</i>	Berberidacea	L	I	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Malva neglecta</i>	Malvaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.002	10
<i>Malva sylvestris</i>	Malvaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.002	10
<i>Medicago arabica</i>	Fabaceae	H	S	CR	LC	-	-	0	0	0.025	20
<i>Medicago lupulina</i>	Fabaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.256	60	1.344	80
<i>Medicago minima</i>	Fabaceae	H	S	LC	VU	-	-	0.001	###	0	0
<i>Medicago sativa</i>	Fabaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.011	5	0	0
<i>Melilotus officinalis</i>	Fabaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.002	10	0	0
<i>Muscari armeniacum</i>	Asparagaceae	H	I	na	na	-	-	0.001	5	0	0
<i>Myosotis arvensis</i>	Boraginaceae	H	I	LC	LC	-	-	0	0	0.003	30
<i>Oenothera biennis cf</i>	Onagraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Oenothera parviflora</i>	Onagraceae	H	S	NT	NE	-	-	0.001	5	0	0
<i>Onobrychis viciifolia</i>	Fabaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.002	10	0	0
<i>Ononis spinosa</i>	Fabaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0

Taxon	Famille	Type plante	Origine supposée	STATUT_LR CH	STATUT_LR GE	Priorité Ge	Responsabilité Ge	Fréquence cumulée tv extensives	Occurrence % tv ext	Fréquence cumulée tv intensives	Occurrence % tv int
<i>Orchis morio</i>	Orchidaceae	H	S	NT	VU	-	-	0	0	0.001	10
<i>Origanum vulgare</i>	Lamiaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.028	45	0.012	40
<i>Orobanche hederæ</i>	Orobanchaceae	H	S	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Osmanthus sp.</i>	Oleaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Oxalis corniculata</i>	Oxalidaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0.003	20
<i>Panicum capillare</i>	Poaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0.001	10
<i>Papaver rhoeas</i>	Papaveraceae	H	P	LC	LC	-	-	0.003	15	0.001	10
<i>Pennisetum alopecuroides</i>	Poaceae	H	P	---	NE	-	-	0	0	0.412	10
<i>Petrorhagia prolifera</i>	Caryophyllaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.022	5	0	0
<i>Petrorhagia saxifraga</i>	Caryophyllaceae	H	P	LC	EN	5	-	1.168	80	0.021	20
<i>Picris hieracioides</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.017	35	0.168	50
<i>Pimpinella saxifraga</i>	Apiaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Pinus mugo</i>	Pinaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Pinus nigra</i>	Pinaceae	L	I	NT	NE	-	-	0.001	5	0	0
<i>Pinus sp cf</i>	Pinaceae	L	I	na	na	-	-	0.003	15	0	0
<i>Pinus sylvestris</i>	Pinaceae	L	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Plantago lanceolata</i>	Plantaginaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.392	35	0.147	60
<i>Plantago media</i>	Plantaginaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Poa angustifolia</i>	Poaceae	H	I	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Poa annua</i>	Poaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.002	10	0.029	40
<i>Poa compressa</i>	Poaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.019	5	0.003	30
<i>Poa pratensis</i>	Poaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.001	5	0.053	50
<i>Poa trivialis s.str.</i>	Poaceae	H	I	LC	LC	-	-	0	0	0.252	30
<i>Polygonum persicaria</i>	Polygonaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.002	10	0	0
<i>Polygonum sp</i>	Polygonaceae	H	S	na	na	-	-	0	0	0.051	20
<i>Populus alba</i>	Salicaceae	L	S	LC	LC	-	-	0.004	20	0	0
<i>Populus nigra sl</i>	Salicaceae	L	S	LC	VU	-	-	0.007	10	0	0
<i>Potentilla argentea</i>	Rosaceae	H	P	LC	VU	-	-	0.376	50	0	0
<i>Potentilla fruticosa</i>	Rosaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.050	10
<i>Potentilla cf inclinata</i>	Rosaceae	H	S	EN	NE	-	-	0.001	5	0	0
<i>Potentilla intermedia</i>	Rosaceae	H	S	VU	CR	-	-	0.001	5	0	0
<i>Potentilla recta</i>	Rosaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.002	10	0	0
<i>Potentilla reptans</i>	Rosaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0.302	40
<i>Prunella vulgaris</i>	Lamiaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.016	30	0.115	60
<i>Prunus laurocerasus</i>	Rosaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.051	20

Taxon	Famille	Type plante	Origine supposée	STATUT_LR CH	STATUT_LR GE	Priorité Ge	Responsabilité Ge	Fréquence cumulée tv extensives	Occurrence % tv ext	Fréquence cumulée tv intensives	Occurrence % tv int
<i>Ranunculus acris ssp friesianus</i>	Ranunculaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0.001	10
<i>Ranunculus bulbosus</i>	Ranunculaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.041	20
<i>Ranunculus muricatus</i>	Ranunculaceae	H	S	---	NE	-	-	0	0	0.001	10
<i>Rhus thyphina</i>	Anacardiaceae	L	S	na	na	-	-	0	0	0.002	20
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Fabaceae	L	S	LC	LC	-	-	0.003	15	0	0
<i>Rorippa palustris</i>	Brassicaceae	H	S	LC	VU	-	-	0.001	5	0	0
<i>Rosa canina</i>	Rosaceae	L	P	LC	LC	-	-	0	0	0.030	30
<i>Rubus fruticosus aggr.</i>	Rosaceae	L	S	na	na	-	-	0.001	5	0.051	30
<i>Rubus sp.</i>	Rosaceae	L	S	na	na	-	-	0.001	5	0	0
<i>Rumex acetosa</i>	Polygonaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Rumex acetosella sl</i>	Polygonaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.002	20
<i>Rumex crispus</i>	Polygonaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Rumex obtusifolius</i>	Polygonaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0.003	30
<i>Sagina apetala ssp erecta</i>	Caryophyllaceae	H	S	VU	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Sagina apetala sstr</i>	Caryophyllaceae	H	S	NT	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Salix caprea</i>	Salicaceae	L	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Salix sp</i>	Salicaceae	L	S	na	na	-	-	0.001	5	0	0
<i>Salvia pratensis</i>	Lamiaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.268	25	0.003	30
<i>Sambucus sp.</i>	Adoxaceae	L	S	LC	LC	-	-	0.003	15	0	0
<i>Sanguisorba minor sl</i>	Rosaceae	H	P	na	na	-	-	0.002	10	0.008	20
<i>Sanguisorba minor ssp polygama</i>	Rosaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.283	50	0	0
<i>Sanguisorba officinalis</i>	Rosaceae	H	S	LC	VU	-	-	0.001	5	0	0
<i>Saponaria ocymoides</i>	Caryophyllaceae	H	I	LC	VU	-	-	0.012	15	0.001	10
<i>Satureja hortensis</i>	Lamiaceae	H	I	NT	NE	-	-	0.001	5	0	0
<i>Saxifraga tridactylites</i>	Saxifragaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.094	30	0	0
<i>Securigera varia</i>	Fabaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Sedum acre</i>	Crassulaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.204	45	0.001	10
<i>Sedum album</i>	Crassulaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.994	75	0.032	30
<i>Sedum dasyphyllum</i>	Crassulaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.010	5	0	0
<i>Sedum floriferum</i>	Crassulaceae	H	P	na	na	-	-	1.006	45	0.389	20
<i>Sedum hispanicum</i>	Crassulaceae	H	P	LC	NE	-	-	0.197	30	0.011	10
<i>Sedum hybridum</i>	Crassulaceae	H	P	na	na	-	-	1.008	65	0.001	10
<i>Sedum kamtschaticum</i>	Crassulaceae	H	P	na	na	-	-	0.004	20	0	0
<i>Sedum montanum</i>	Crassulaceae	H	P	na	na	-	-	0.007	40	0.001	10
<i>Sedum rupestre (S. reflexum)</i>	Crassulaceae	H	P	na	na	-	-	0.009	45	0.012	20

Taxon	Famille	Type plante	Origine supposée	STATUT_LR CH	STATUT_LR GE	Priorité Ge	Responsabilité Ge	Fréquence cumulée tv extensives	Occurrence % tv ext	Fréquence cumulée tv intensives	Occurrence % tv int
<i>Sedum rupestre aggr.</i>	Crassulaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.592	55	0	0
<i>Sedum sexangulare</i>	Crassulaceae	H	P	LC	LC	-	-	1.011	70	0.012	20
<i>Sedum spurium</i>	Crassulaceae	H	P	na	na	-	-	0.181	65	0.027	30
<i>Senecio inaequidens</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Senecio vulgaris</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.005	25	0.003	40
<i>Sesleria autumnalis</i>	Poaceae	H	P	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Setaria pumila</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.006	30	0.002	20
<i>Setaria verticillata</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Setaria viridis</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0.596	10
<i>Sherardia arvensis</i>	Rubiaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.170	10
<i>Silene nutans</i>	Caryophyllaceae	H	P	LC	VU	-	-	0.670	50	0.007	20
<i>Silene vulgaris sstr</i>	Caryophyllaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.052	15	0	0
<i>Solanum nigrum</i>	Solanaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.005	30	0.001	10
<i>Solidago canadensis</i>	Asteraceae	H	I	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Solidago gigantea</i>	Asteraceae	H	I	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Sonchus asper</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.024	70	0.136	60
<i>Sonchus oleraceus</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.029	20	0.003	40
<i>Spiraea japonica</i>	Rosaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Spiraea x vanhouttei</i>	Rosaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.271	20
<i>Spiranthes spiralis</i>	Orchidaceae	H	S	NT	CR	-	-	0.001	5	0	0
<i>Stachys officinalis</i>	Lamiaceae	H	I	LC	LC	-	-	0.011	5	0	0
<i>Stachys recta sstr</i>	Lamiaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.002	10	0	0
<i>Stellaria media</i>	Caryophyllaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.004	20	0.018	20
<i>Syringa vulgaris</i>	Oleaceae	L	P	NT	NE	-	-	0	0	0.001	10
<i>Taraxacum officinale</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0.023	65	0.152	90
<i>Taxus baccata</i>	Taxaceae	L	P	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Teucrium botrys</i>	Lamiaceae	H	S	NT	CR	2	-	0.025	20	0.080	10
<i>Teucrium chamaedrys</i>	Lamiaceae	H	P	LC	NT	-	-	0.004	20	0	0
<i>Thymus praecox s. str.</i>	Lamiaceae	H	P	LC	CR	4	2	0	0	0.001	10
<i>Thymus pulegioides</i>	Lamiaceae	H	P	LC	LC	-	-	0.288	40	0.080	20
<i>Thymus serpyllum aggr.</i>	Lamiaceae	H	P	na	na	-	-	0.303	15	0.055	10
<i>Thymus vulgaris</i>	Lamiaceae	H	P	---	NE	-	-	0.081	20	0.050	10
<i>Tragopogon pratensis ssp orientalis</i>	Asteraceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.003	30
<i>Trifolium arvense</i>	Fabaceae	H	S	LC	NT	-	-	0.171	10	0.504	30

Taxon	Famille	Type plante	Origine supposée	STATUT_LR CH	STATUT_LR GE	Priorité Ge	Responsabilité Ge	Fréquence cumulée tv extensives	Occurrence % tv ext	Fréquence cumulée tv intensives	Occurrence % tv int
<i>Trifolium aureum</i>	Fabaceae	H	S	NT	VU	-	-	0.001	5	0	0
<i>Trifolium dubium</i>	Fabaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.060	35	0.073	40
<i>Trifolium hybridum sp. elegans</i>	Fabaceae	H	S	VU	NE	-	-	0	0	0.001	10
<i>Trifolium hybridum sstr</i>	Fabaceae	H	P	LC	NE	-	-	0.041	5	0.006	10
<i>Trifolium pratense sstr</i>	Fabaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.040	20	0.012	30
<i>Trifolium repens</i>	Fabaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.009	20	0.114	90
<i>Triticum aestivum</i>	Poaceae	H	S	LC	NE	-	-	0.001	5	0	0
<i>Ulmus glabra</i>	Ulmaceae	L	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Valeriana dioica</i>	Caprifoliaceae	H	S	LC	EN	5	-	0	0	0.001	10
<i>Verbascum thapsus</i>	Scrophulariaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.002	10	0.006	10
<i>Verbena officinalis</i>	Verbenaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Veronica arvensis</i>	Plantaginaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.012	35	0.004	40
<i>Veronica chamaedrys</i>	Plantaginaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0.001	10
<i>Veronica officinalis</i>	Plantaginaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.001	5	0	0
<i>Veronica persica</i>	Plantaginaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.012	10	0.054	40
<i>Veronica serpyllifolia sstr</i>	Plantaginaceae	H	S	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Viburnum opulus</i>	Adoxaceae	L	P	LC	LC	-	-	0	0	0.001	10
<i>Viburnum plicatum</i>	Adoxaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	Adoxaceae	L	P	na	na	-	-	0	0	0.001	10
<i>Vicia hirsuta</i>	Fabaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.121	30	0.110	30
<i>Vicia sativa</i>	Fabaceae	H	I	LC	NE	-	-	0.001	5	0.028	30
<i>Vicia sativa ssp nigra</i>	Fabaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.007	10	0.512	40
<i>Vicia tetrasperma</i>	Fabaceae	H	S	NT	LC	-	-	0.001	5	0.001	10
<i>Viola arvensis</i>	Violaceae	H	S	LC	LC	-	-	0.008	10	0	0
<i>Viola tricolor</i>	Violaceae	H	S	na	na	-	-	0	0	0.028	20
<i>Vulpia myuros</i>	Poaceae	H	S	NT	LC	-	-	1.010	60	0.433	30

Annexe 2 : Liste des bryophytes recensées

Taxons	Liste rouge CH	Liste rouge GE
<i>Amblystegium serpens</i> (Hedw.) Schimp.	LC	LC
<i>Aulacomnium palustre</i> (Hedw.) Schwägr.	LC	RE
<i>Barbula convoluta</i> Hedw.	LC	LC
<i>Barbula unguiculata</i> Hedw.	LC	LC
<i>Brachythecium albicans</i> (Hedw.) Schimp.	LC	NT
<i>Brachythecium rutabulum</i> (Hedw.) Schimp.	LC	LC
<i>Bryum argenteum</i> Hedw.	NE	LC
<i>Bryum caespitium</i> Hedw. subsp. <i>caespitium</i>	DD	LC
<i>Bryum caespitium</i> subsp. <i>badium</i> (Brid.) Lindb.	DD	nouveau
<i>Bryum capillare</i> Hedw.	LC	LC
<i>Bryum creberrimum</i> Taylor	NT	nouveau
<i>Bryum klinggraeffii</i> Schimp.	LC	nouveau
<i>Calliergonella cuspidata</i> (Hedw.) Loeske	LC	LC
<i>Campylopus introflexus</i> (Hedw.) Brid.	LC	LC
<i>Ceratodon purpureus</i> (Hedw.) Brid. subsp. <i>purpureus</i>	LC	LC
<i>Climacium dendroides</i> (Hedw.) F. Weber & D. Mohr	LC	LC
<i>Cratoneuron filicinum</i> (Hedw.) Spruce	LC	LC
<i>Eurhynchium striatum</i> (Hedw.) Schimp.	NE	LC
<i>Funaria hygrometrica</i> Hedw.	LC	LC
<i>Grimmia pulvinata</i> (Hedw.) Sm.	LC	LC
<i>Homalothecium lutescens</i> (Hedw.) H. Rob.	LC	LC
<i>Hypnum cupressiforme</i> Hedw.	NE	LC
<i>Leptobryum pyriforme</i> (Hedw.) Wilson	LC	DD
<i>Marchantia polymorpha</i> L.	LC	LC
<i>Mnium spinosum</i> (Voit) Schwägr.	LC	nouveau
<i>Orthotrichum diaphanum</i> Brid.	LC	LC
<i>Oxyrrhynchium hians</i> (Hedw.) Loeske	LC	LC
<i>Plagiomnium undulatum</i> (Hedw.) T.J. Kop.	LC	LC
<i>Plagiopus oederianus</i> (Sw.) H.A. Crum & L.E. Anderson	NT	CR
<i>Polytrichum strictum</i> Brid.	NT	nouveau
<i>Pseudocrossidium revolutum</i> (Brid.) R.H. Zander	CR	EN
<i>Pseudoscleropodium purum</i> (Hedw.) M. Fleisch.	LC	LC
<i>Racomitrium canescens</i> (Hedw.) Brid. subsp. <i>canescens</i>	LC	EN
<i>Syntrichia ruralis</i> (Hedw.) Web. & Mohr	LC	LC
<i>Tortella inclinata</i> (Hedw. f.) Limpr.	LC	LC
<i>Tortella tortuosa</i> (Hedw.) Limpr.	LC	LC
<i>Trichostomum crispulum</i> Bruch	LC	LC
<i>Weissia longifolia</i> Mitt.	NT	RE

La biodiversité entomologique des toitures végétalisées du canton de Genève

RAPPORT FINAL DU PROJET TVEG 2014-2016



Genève, le 17 février 2016

Auteurs :

Gaël Pétremand, assistant de recherche

Dr Sophie Rochefort, professeur HES et responsable de la filière agronomie

Résumé :

L'entomofaune présente sur une trentaine de toitures végétalisées sur le canton de Genève a été échantillonnée en 2014 (printemps et automne) et en 2015 (printemps) au moyen de pièges à fosse (entomofaune épigée) et de pièges « Combi » (entomofaune aérienne). Tous les arthropodes collectés ont été dénombrés et triés en grand groupes systématiques. Les membres de la famille des Carabidae (Coleoptera) ont été identifiés à l'espèce pour affiner l'analyse en termes de richesse spécifique.

Les objectifs de l'étude étaient : i) de déterminer les principaux groupes d'arthropodes (épigés et aériens) ainsi que les communautés carabiques présentes sur les toitures, ii) d'évaluer l'effet du type de toiture (intensif, extensif) et de son âge (< 10 ans, > 10 ans) sur le nombre d'arthropodes total, de prédateurs, de décomposeurs ainsi que sur la richesse spécifique et le nombre de carabes iii) de mettre en lumière les facteurs principaux (végétation, substrat) qui influencent l'entomofaune présente sur ces toitures. Au terme de l'échantillonnage 58'782 arthropodes dont 1'827 carabes appartenant à 41 espèces (dont deux sur la liste rouge suisse et nouvelles pour le canton) ont été collectés.

Les résultats montrent généralement que les toitures intensives ainsi que les toitures intensives de plus de 10 ans favorisent l'abondance totale des arthropodes, mais pas spécifiquement celle des prédateurs et des décomposeurs. Les toitures extensives à substrat plus terreux et plus épais (> 12 cm) permettent l'établissement d'une végétation davantage recouvrante et d'une entomofaune plus importante que sur les autres toitures extensives. Le même phénomène s'observe vis-à-vis de l'abondance et de la richesse spécifique des carabes. L'ensemble de la communauté carabique échantillonnée sur les toitures est composée à 31.7 % d'espèces xérophiles et à 58.5 % d'espèces mésophiles, ce qui indique des conditions d'humidité particulières, du moins sur certaines toitures, qui permettent à des espèces xérophiles de s'établir. Les paramètres liés à l'entomofaune semblent être particulièrement corrélés avec le taux de recouvrement de la végétation, le nombre de strates de cette végétation ainsi que l'épaisseur du substrat. Concernant l'entomofaune aérienne, l'observation d'individus de la super-famille des Apoidea démontre l'attractivité florale des toitures en tant que source de nectar et de pollen. La prédominance de l'abeille mellifère vis-à-vis du reste des Apoidea, soulève la question de la compétition pour les ressources entre elles dans un contexte urbain où l'implémentation de ruches est de plus en plus fréquente.

Le constat principal de cette étude est que pour favoriser la biodiversité entomologique sur ces structures vertes, il est important de respecter des critères d'établissement et d'entretien de celles-ci (épaisseur minimale de substrat de 12 cm, diversité végétale, etc.) sans quoi, l'entomofaune arrivera difficilement à s'y implanter diminuant ainsi l'intérêt des toitures végétalisées en terme de biodiversité en milieu urbain.

Illustration de couverture : Piège « Combi » pour la capture d'insectes aériens sur la toiture végétalisée du collège de la Seymaz, Genève.

Table des matières

1. INTRODUCTION	2
2. MATÉRIEL & MÉTHODES	3
2.1 SITES D'ÉTUDE	3
2.2 ECHANTILLONNAGE	3
2.2.1 Entomofaune épigée	3
2.2.2 Entomofaune aérienne	4
2.3 TRI ET DÉTERMINATION	4
2.4 ANALYSE ET STATISTIQUES	5
3. RÉSULTATS	6
3.1 ENTOMOFAUNE ÉPIGÉE	6
3.1.1 Arthropodes	6
3.1.2 Carabidae	10
3.2 ENTOMOFAUNE AÉRIENNE	13
3.3 INTERACTIONS ENTRE L'ENTOMOFAUNE, LA VÉGÉTATION ET LE SUBSTRAT	14
4. DISCUSSION	19
4.1 ARTHROPODES	19
4.2 CARABIDAE	19
4.3 ENTOMOFAUNE AÉRIENNE	20
4.4 INTERACTIONS AVEC LA VÉGÉTATION ET LE SUBSTRAT	21
5. CONCLUSION	22
6. BIBLIOGRAPHIE	24
ANNEXES	26

1. Introduction

Le rôle des toitures végétalisées en tant que support pour la biodiversité végétale et entomologique a été aujourd'hui investigué par plusieurs études, cependant celui-ci reste peu documenté (Williams et al. 2014). En particulier, peu d'informations existent sur les interactions complexes qui ont lieu entre le substrat (type, épaisseur, etc.), la végétation et les arthropodes. La diversité des arthropodes semblerait être influencée positivement par le taux de recouvrement de la végétation (Schindler et al. 2011), par la diversité des structures de végétation (mousse, prairie, buissons) présentes sur une toiture (Madre et al. 2013) ou encore par l'hétérogénéité de l'épaisseur du substrat (Brenneisen 2003).

L'objectif des toitures végétalisées étant entre autres de créer des habitats urbains alternatifs pour la biodiversité, il est primordial de rechercher les facteurs qui influencent son établissement et sa pérennité afin d'optimiser de telles ouvrages à l'avenir.

L'intérêt des toitures végétalisées en tant qu'objet de conservation de la biodiversité urbaine reste également peu connu. Pour certains groupes d'arthropodes (araignées, coléoptères, hyménoptères), plusieurs études ont révélé la présence d'espèces menacées (Brenneisen 2003 ; Kadas 2006 ; n+p 2015). Les toitures jouent également un rôle clé pour la connectivité des habitats urbains, en particulier pour les arthropodes très mobiles (abeilles, charançons) (Braaker et al. 2014). Les autres habitats urbains semblent tout de même posséder une plus grande richesse et diversité d'arthropodes ainsi qu'une communauté d'arthropodes distincte de celles des toitures végétalisées (MacIvor & Lundholm 2010 ; Tonietto et al. 2011 ; Braaker et al. 2014 ; Williams et al. 2014).

Dans ce travail, la famille des Carabidae (Coleoptera) sera étudiée plus en détails, car étant sensibles aux perturbations de leur milieu, ils sont de bons bioindicateurs (Rainio & Niemelä 2003). La richesse en carabes est considérée comme étant représentative de la diversité d'autres groupes d'arthropodes (Jones & Leather 2012). Cette famille est donc représentative de l'entomofaune et ce en particulier en milieu urbain (Jones & Leather 2012). Les carabes ont déjà été l'objet de plusieurs études sur les toitures végétalisées en Suisse (Brenneisen 2003; Braaker et al. 2014) et ailleurs dans le monde (MacIvor & Lundholm 2010, Kadas 2006; Meierhofer 2013).

Les objectifs du projet concernant le volet biodiversité entomologique sont : i) de déterminer les principaux groupes d'arthropodes (épigés et aériens) ainsi que les communautés carabiques présents sur les toitures, ii) d'évaluer l'effet du type de toiture (intensif, extensif) et de son âge (< 10 ans, > 10 ans) sur le nombre d'arthropodes total, de prédateurs, de décomposeurs ainsi que sur la richesse spécifique et le nombre de carabes iii) de mettre en lumière les facteurs principaux (végétation, substrat) qui influencent l'entomofaune présente sur les toitures afin d'émettre des recommandations permettant de favoriser cette biodiversité lors de nouvelles installations de toitures végétalisées sur le canton de Genève.

2. Matériel & Méthodes

2.1 Sites d'étude

Les relevés ont été effectués sur toutes les toitures prises en compte dans l'ensemble de l'étude (Tableaux 1 et 2, introduction générale), c'est-à-dire une vingtaine de toitures extensives dont la moitié a moins de 10 ans et l'autre moitié plus de 10 ans, ainsi qu'une dizaine de toitures intensives dont la moitié a moins de 10 ans et l'autre, plus de 10 ans. Toutes les toitures se situent dans le canton de Genève et plus précisément dans l'espace urbain genevois.

2.2 Echantillonnage

2.2.1 Entomofaune épigée

La biodiversité de l'entomofaune à la surface du sol a été échantillonnée sur les 30 toitures végétalisées avec la méthode des pièges fosses (pièges Barber ; Fig. 1), très utilisée pour collecter les carabes et les autres insectes épigés (Greenslade 1964). Les pièges fosses sont constitués de deux gobelets en plastique recyclable imbriqués l'un dans l'autre et installés dans le sol (ou substrat) à raison de quatre à cinq pièges par toiture (Fig. 1). De l'éthylène glycol a été utilisé comme solution dans les pièges car ce produit s'évapore peu et conserve relativement bien les arthropodes. Les pièges ont été relevés tous les sept jours pendant trois semaines consécutives durant trois périodes distinctes : 1) de mai-juin 2014 2) d'août-septembre 2014 et 3) de avril-mai 2015. Une fois récolté, le contenu de chaque piège a été transféré dans des flacons en plastique avec de l'alcool à 70% pour une identification ultérieure en laboratoire.

Des pertes d'environ 15% ont été observées durant les trois périodes d'échantillonnage, pertes principalement dues aux oiseaux ou autres petits mammifères qui délogent les pièges et les vident de leur contenu.

Les résultats des prises des pièges à fosse seront interprétés comme une mesure de densité d'activité et non de densité absolue, les captures étant influencées par la mobilité et l'activité de l'entomofaune (Kotze et al. 2011).



Figure 1: Piège Barber sur la toiture du collège des Pommiers au Grand-Saconnex.

2.2.2 Entomofaune aérienne

Les pièges « Combi » (WSL) (Fig.2) ont été rajoutés au protocole d'échantillonnage après la première période de capture en 2015. Ils permettent de capturer l'entomofaune aérienne de passage sur une toiture par une combinaison de deux types de piège. Ils sont constitués d'un large entonnoir jaune d'environ 50 cm de diamètre (type piège chromatique attractif) sur lequel sont disposées deux plaques transparentes en polycarbonate entrecroisées contre lesquelles se heurtent les insectes qui volent en-dessus de l'entonnoir (type piège à interception). Le fonds de l'entonnoir est rempli d'environ 2 L d'eau savonneuse dans laquelle les insectes tombent et se noient. L'entonnoir est soutenu par une structure en bois à une hauteur d'environ 1 m au dessus du sol. Quatre poids d'environ 5 kg chacun soutiennent le piège afin qu'il reste ancré au sol.

Dix pièges ont été installés sur dix toitures dans le canton (quatre intensives et six extensives) d'avril à fin juin 2015 durant une période totale de sept semaines avec un relevé hebdomadaire.



Figure 2 : Piège « Combi » sur la toiture de la salle de gym du collège des Pommiers au Grand-Saconnex.

2.3 Tri et détermination

Les échantillons des pièges Barber ont été triés en grands groupes taxonomiques de niveaux systématiques différents (Annexe A). Les carabes (Coleoptera : Carabidae) ont été extraits des échantillons et identifiés à l'espèce à l'aide de clés dichotomiques (Trautner et Geigenmüller 1987 ; Müller-Motzfeld 2004 ; Luff et Turner 2007). Les identifications ont été vérifiées par Yannick Chittaro (CSCF, Neuchâtel) et Werner Marggi (Carfauna, NMBE, Berne).

Les insectes récoltés dans les pièges « Combi » ont été triés de manière similaire aux échantillons des pièges Barber et donc classés en grand groupes taxonomiques. Cependant, la classification a été effectuée de manière plus fine au niveau des différentes familles de l'ordre des coléoptères et des hémiptères notamment (Annexe B). Les carabes ont également été extraits des échantillons et identifiés à l'espèce.

2.4 Analyse et statistiques

Afin d'appréhender des différences statistiques entre le type et l'âge des toitures, le test non-paramétrique à deux échantillons de Mann-Whitney (U) (Hollander & Wolfe 1973) a été appliqué aux données.

Pour l'analyse, certains groupes d'arthropodes ont été regroupés en groupes trophiques : les prédateurs et les décomposeurs. Les prédateurs sont composés des groupes suivants : Araneae, Carabidae, Staphylinidae, Coccinellidae, Nabidae, Anthocoridae et Chilopoda, et les décomposeurs des groupes suivants : Collembola, Isopoda et Diplopoda. Les groupes ayant de trop grandes variations du régime trophique à l'intérieur ainsi que les phytophages n'ont pas été distingués mais ont tout de même été inclus dans l'analyse.

Des paramètres concernant la végétation et le substrat ont été sélectionnés pour tenter de les mettre en relation avec l'entomofaune épigée. Les paramètres retenus sont les suivants :

- Entomofaune :
 - Nombre d'arthropodes moyen par piège au printemps 2014 et 2015 (Arth)
 - Nombre de Carabidae moyen par piège au printemps 2014 et 2015 (Car)
 - Richesse spécifique en Carabidae au printemps 2014 et 2015 (Rich_Car)
- Végétation :
 - Pourcentage de recouvrement des plantes vasculaires en 2014 et 2015 (Rec_PV)
 - Pourcentage de recouvrement des bryophytes en 2014 et 2015 (Rec_Bry)
 - Richesse spécifique des plantes vasculaires (Rich_PV)
 - Richesse spécifique des Bryophytes (Ric_Bryo)
 - Nombre de strates de végétation (1, 2 ou 3) (Stra)
- Substrat
 - Pourcentage de matière organique (Pc_MO)
 - Rapport Carbone/Azote (Rap_C/N)
 - Epaisseur du substrat (Ep_SUB)
 - Valeur du pH (pH)

Les coefficients de corrélation des rangs de Spearman ont été calculés entre chacune de ces variables. Une *Analyse des Composantes Principales* (ACP) a été appliquée à la plupart de ces paramètres pour les printemps 2014 et 2015. Ces calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel Minitab® 17.1.0 (Minitab Inc.).

3. Résultats

3.1 Entomofaune épigée

3.1.1 Arthropodes

Pour les trois périodes d'échantillonnage, dans les pièges Barber, 58'782 arthropodes ont été triés et classés. Au printemps 2014 et 2015 respectivement 24'015 et 25'012 arthropodes ont été collectés contre 9'755 à l'automne 2014. L'activité et la présence de l'entomofaune étant plus importantes au printemps sur les toitures.

Les groupes les plus présents identifiés sur les toitures sont les Formicidae, les Collembola, les Acari, les Isopoda, les Araneae, les Aphididae, les Cercopidea et les Carabidae (Fig. 3 & 4). Ces groupes font, pour la plupart partie de la faune épigée, vivant à la surface ou dans la couche superficielle du sol.

Ces principaux groupes d'arthropodes identifiés sont relativement similaires sur les deux types de toitures. La principale différence est la présence importante de cloportes (Isopoda) sur les toitures intensives, pratiquement absents des toitures extensives (Fig. 3 & 4). Les diptères (Diptera) ont une moindre importance sur les toitures intensives. Au niveau de la représentativité de certains groupes, les grandes différences entre les deux types de toitures résident dans : une grande proportion de collemboles sur les extensives et une plus grande représentativité des fourmis (Formicidae) et des acariens (Acari) sur les intensives. Quant aux autres groupes les proportions restent relativement proches suivant le type de toiture.

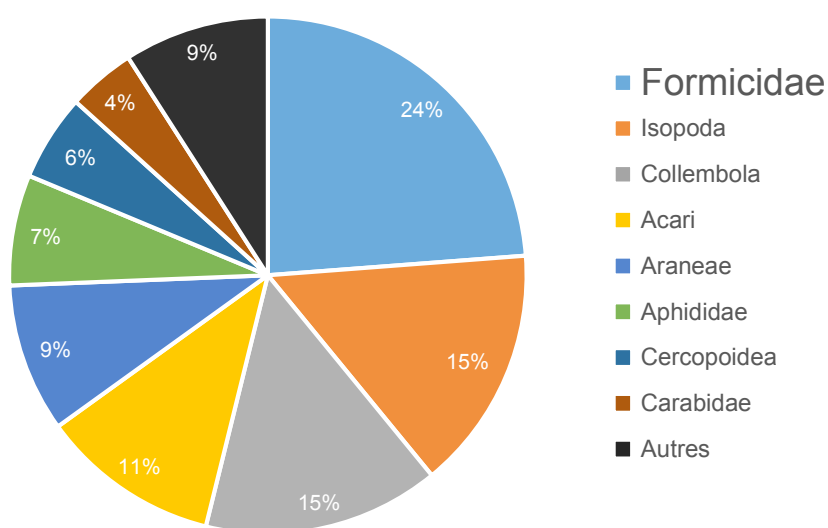


Figure 3. Proportion des principaux groupes d'arthropodes sur les toitures intensives au printemps 2014. Pourcentage calculé à partir du nombre moyen d'individus par piège.

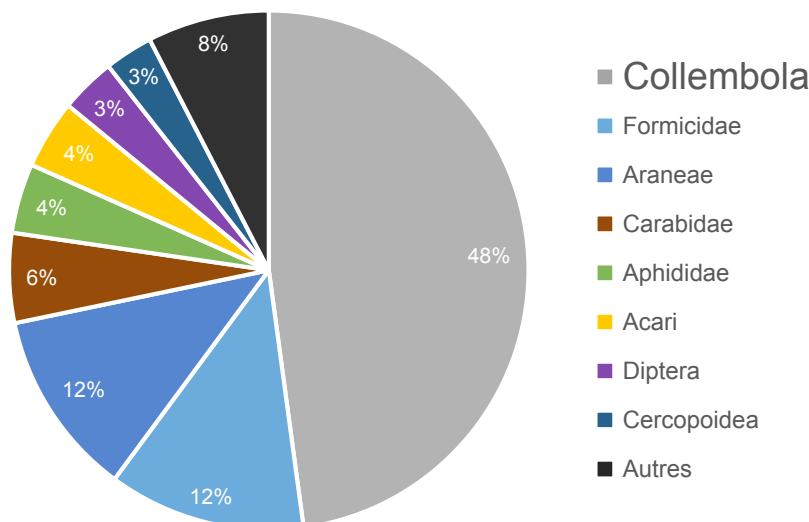


Figure 4. Proportion des principaux groupes d'arthropodes sur les toitures extensives au printemps 2014. Pourcentage calculé à partir du nombre moyen d'individus par piège.

Globalement, il y avait significativement plus d'arthropodes en moyenne par piège sur les toitures intensives que sur les toitures extensives au printemps 2014 ($U = 157$, $p = 0.0253$) et de la même manière significativement plus d'arthropodes sur les toitures de plus de 10 ans vis-à-vis des jeunes toitures de moins de 10 ans, indépendamment du type de toiture ($U = 156$, $p = 0.0327$). En automne, ce constat est aussi valable par rapport à l'âge des toitures ($U = 170$, $p = 0.0424$) mais pas pour le type de toiture où la différence n'est pas significative ($U = 162$, $p = 0.5977$). Au niveau des groupes fonctionnels (prédateurs et décomposeurs), aucune différence significative n'est décelée entre le type ou l'âge des toitures (Annexe C). Par contre, les Formicidae, non-considerée dans ces deux groupes trophiques, montrent une différence significative au printemps 2014 entre les deux types de toitures ($U = 163$, $p = 0.012$) avec une abondance plus importantes sur les toitures de type intensive. Au vu de l'abondance dominante des fourmis dans les pièges Barber à cette période, la différence décelée au niveau statistique pour la totalité des arthropodes pourrait être alors expliquée par l'abondance des fourmis. Au printemps 2015, la différence au niveau du nombre d'arthropodes est également significative selon le type de toiture ($U = 198$, $p = 0.0293$) mais pas selon l'âge ($U = 238$, $p = 0.5854$) avec plus d'arthropodes sur les toitures de type intensive. Pour les prédateurs et les décomposeurs les relevés de cette période n'indiquent aucune différence significative entre les différentes toitures tant au niveau du type que de l'âge de ces dernières, tout comme cela avait été relevé pour l'automne 2014 (Annexe C).

Les effectifs moyens par piège des prédateurs, des décomposeurs et du total des arthropodes sont illustrés pour les trois périodes d'échantillonnage sur les Figures 5, 6 et 7. L'automne montre très nettement des effectifs plus faibles d'arthropodes comparé aux deux périodes d'échantillonnage printanières. A cette même période, on observe des nombres d'arthropodes et de décomposeurs toujours plus importants sur les toitures de plus de 10 ans. Entre les deux printemps 2014 et 2015, les graphiques sont relativement similaires. On constate cependant entre les deux années une grande différence du nombre de décomposeurs présents sur les toitures extensives de plus de 10 ans (plus de décomposeurs en 2014). Cela se répercute par une différence entre les classes d'âge des

toitures plus importante en 2014 (significative) qu'en 2015 (non significative). Pour les deux printemps la différence entre les types de toiture pour la totalité des arthropodes est facilement appréhendable sur les Figures 5 et 7. Il semble que de manière générale, sur les toitures extensives, il y ait toujours plus d'arthropodes sur les toitures de plus de 10 ans (prédateurs et décomposeurs compris). A l'inverse, sur les toitures intensives, les effectifs sont généralement plus importants sur les toitures de moins de 10 ans (excepté à l'automne).

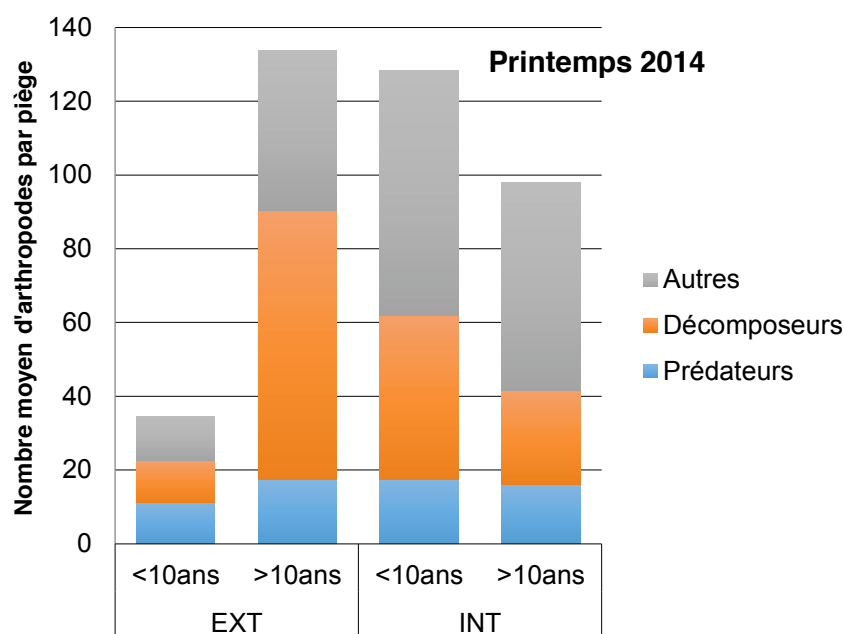


Figure 5. Nombre moyen de prédateurs, de décomposeurs et d'autres arthropodes par piège au printemps 2014.

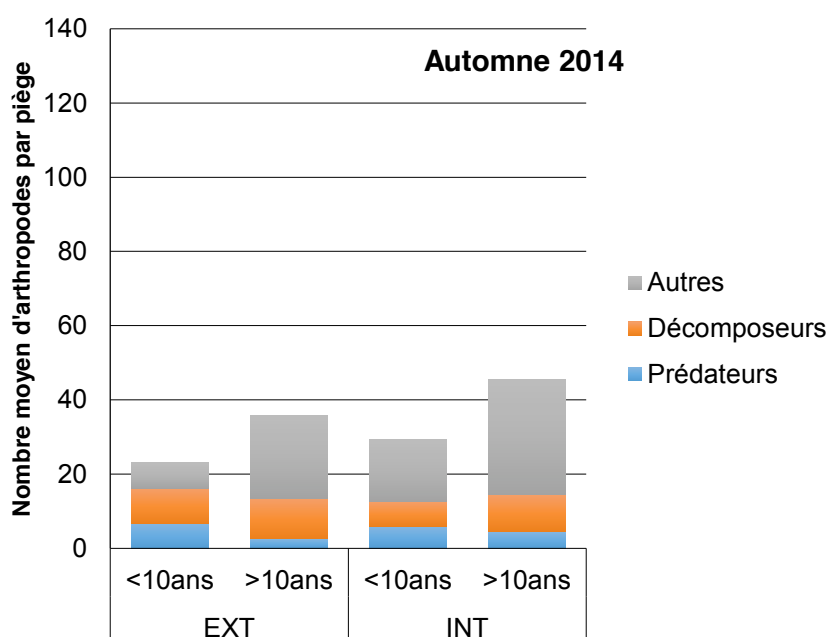


Figure 6. Nombre moyen de prédateurs, de décomposeurs et d'autres arthropodes par piège au printemps 2014.

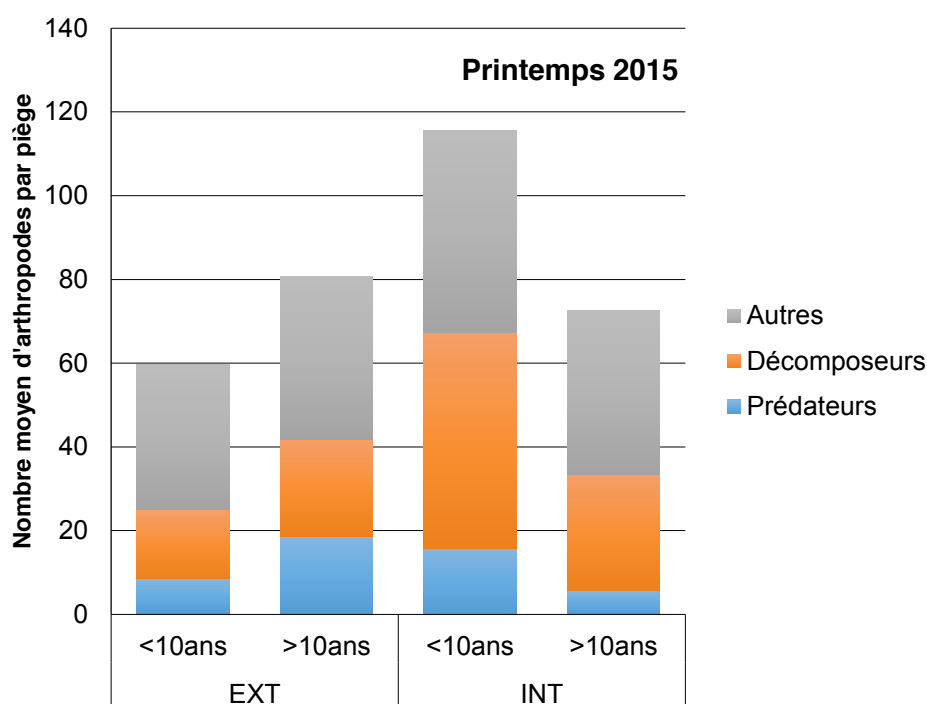


Figure 7. Nombre moyen de prédateurs, de décomposeurs et d'autres arthropodes par piège au printemps 2015.

La Figure 8 montre les *boxplots* des valeurs moyennes d'arthropodes par piège en fonction du type et de l'âge des toitures au printemps 2014. On voit que pour les toitures extensives, la différence entre les toitures de moins ou de plus de 10 ans est flagrante alors que chez les toitures intensives cette différence n'apparaît pas ou peu. En effet, les valeurs des toitures extensives de plus de 10 ans sont très variables alors que celles de moins de 10 ans possèdent toutes des valeurs très proches.

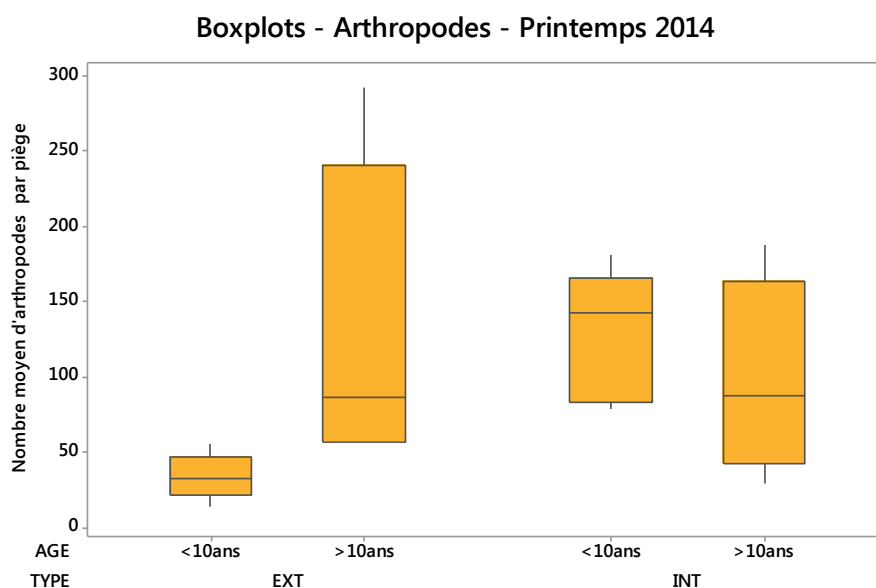


Figure 8 : *Boxplots* du nombre moyen d'arthropodes par piège en fonction du type et de l'âge des toitures au printemps 2014.

3.1.2 Carabidae

Dans le cadre du projet, 1'827 carabes ont été échantillonnés de 41 espèces identifiées.

Parmi ces espèces, deux sont inscrites sur la liste rouge suisse (classe : R « très rare ») (Huber & Marggi 2005) et présentent une importance pour la conservation de la biodiversité au niveau national : *Amara kulti* (Fig. 9) et *A. fulvipes*. L'une d'elle, *Amara kulti* n'est pas mentionnée dans la liste des Carabidae du canton de Genève (Marggi 2012) et représente donc une nouvelle espèce pour le canton.



Figure 9 : *Amara kulti*, une espèce sur la liste rouge suisse et nouvelle pour le canton de Genève.

Un tiers des espèces environ (31.7%) sont des espèces xérophiles, une espèce est sténoxérophile (*Brachinus explodens*), 7.3% sont hygrophiles et le reste des espèces est mésophile (58.5 %) selon Luka et al. (2009) (c.f. Annexe D).

Au printemps 2014, la richesse spécifique est significativement plus importante sur les toitures intensives qu'extensives ($U = 167$, $p = 0.022$). Cette différence n'est par contre pas significative pour l'automne 2014 et le printemps 2015. La Figure 10 reflète en partie cette différence « intensives – extensives » pour le printemps 2014 mais elle montre surtout que, de manière générale, la richesse en espèces est particulièrement faible sur les toitures extensives de moins de 10 ans.

Pour les trois périodes d'échantillonnage, une tendance similaire s'observe à savoir que les richesses spécifiques sont presque toujours moins grandes sur les toitures extensives qu'intensives. Vis-à-vis des toitures de moins de 10 ans, celles de plus de 10 ans possèdent toujours des richesses supérieures pour les toitures extensives et inférieures sur les toitures intensives. Malgré ces tendances, aucune différence n'est statistiquement significative.

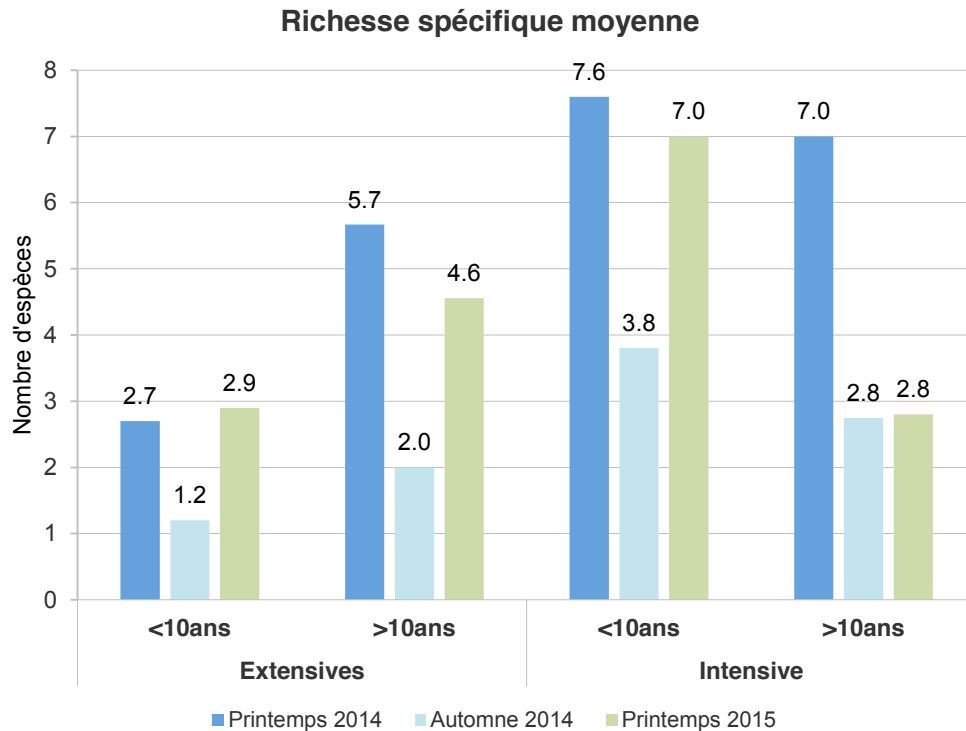


Figure 10. Richesse spécifique moyenne en Carabidae suivant le type et l'âge des toitures pour les trois périodes d'échantillonnage.

Sur la Figure 11, il est possible d'observer la variabilité des valeurs des richesses au sein d'un même type de toiture. Il existe notamment une forte variabilité dans les toitures intensives de moins de 10 ans alors que pour les plus de 10 ans les valeurs sont très proches. Il faut donc considérer les valeurs moyennes de la Figure 10 avec précaution, sachant que parfois une forte variabilité existe.

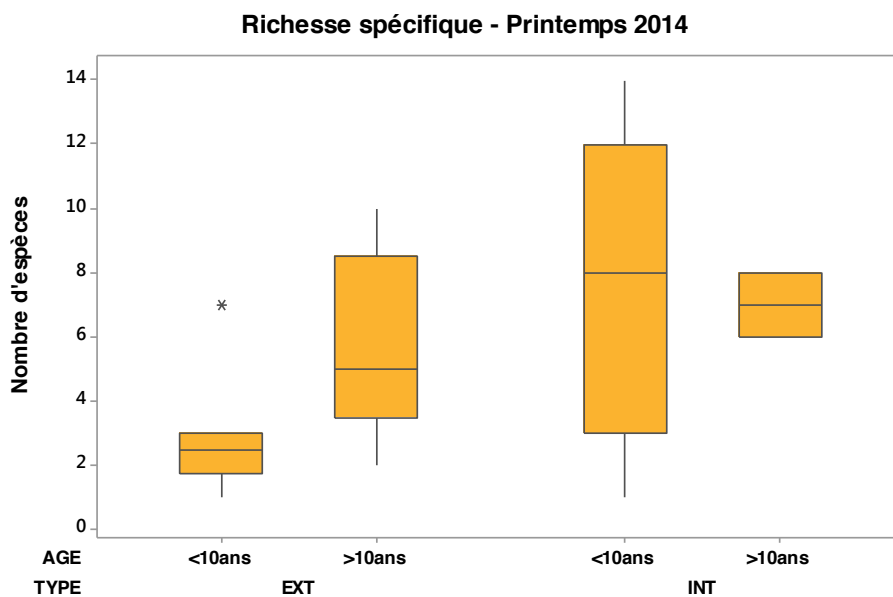


Figure 11. Boxplots de la richesse carabique en fonction du type et de l'âge des toitures au printemps 2014. * = valeur aberrante.

Concernant la densité d'activité des carabes, les tendances sont relativement similaires à celles observées pour la richesse spécifique moyenne (mise à part pour l'automne 2014 où elles sont peu variables suivant le type et l'âge des toitures (Fig. 12)). Les valeurs de densité d'activité sont ainsi toujours plus importantes sur les toitures extensives de plus de 10 ans vis-à-vis des moins de 10 ans et inversement sur les toitures intensives. Les densités d'activité du printemps 2014 et celles du printemps 2015 sont très inégales, probablement en raison de conditions climatiques non comparables et à un échantillonnage plus précoce en 2015. Par contre, aucune différence significative n'a été trouvée entre les différentes périodes d'échantillonnage suivant le type ou l'âge des toitures.

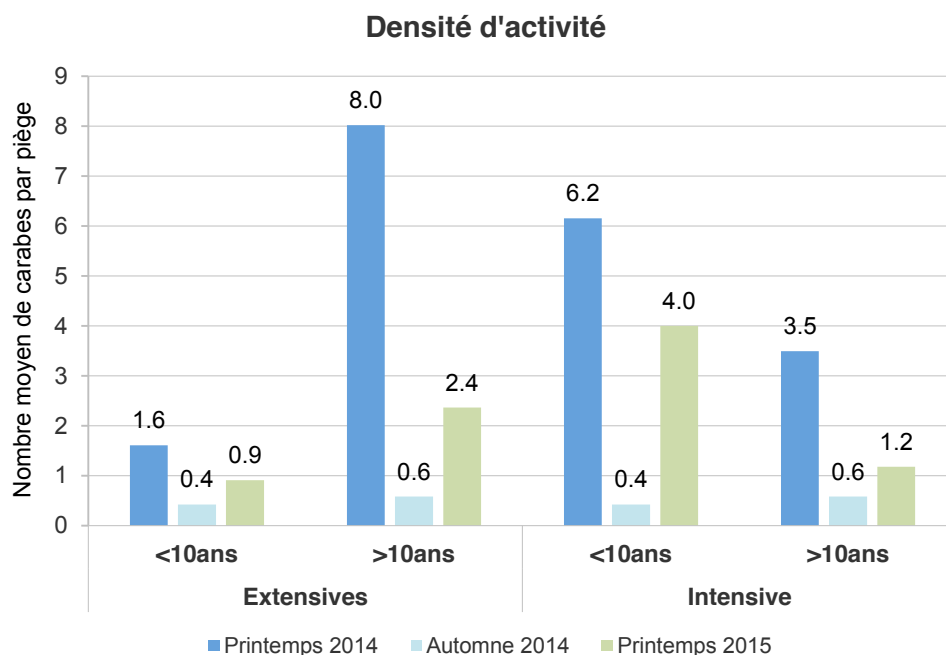


Figure 12. Nombre moyen de Carabidae par piège suivant le type et l'âge des toitures pour les trois périodes d'échantillonnage.

Au niveau de la différence de composition spécifique en carabes entre les toitures extensives et les intensives, l'indice de similarité de Jaccard a été calculé pour chaque période à partir des données de présence-absence de chaque espèce. Cet indice permet d'évaluer la similarité asymétrique entre deux ensembles d'objets à partir de données binaires (p.ex. données de présence-absence). Plus l'indice de Jaccard est grand plus le nombre d'espèces différentes de carabes est élevé. En 2014, cet indice est de 40.6 % et 39.1 % respectivement au printemps et à l'automne. Au printemps 2015, l'indice de Jaccard est de 48 %. Les compositions sont donc toujours très différentes ; plus de la moitié des espèces de carabes ne sont pas présentes dans les deux types de toiture à chaque période. Par contre, concernant les préférences en terme d'humidité des espèces présentes, les deux types de toitures montrent des taux d'espèces xérophiles très similaires (intensives : 42.4 %, extensives 41.6 %) ainsi que des nombres d'espèces relativement proches dans chaque catégorie (Fig. 13). Peu d'espèces sont hygrophiles.

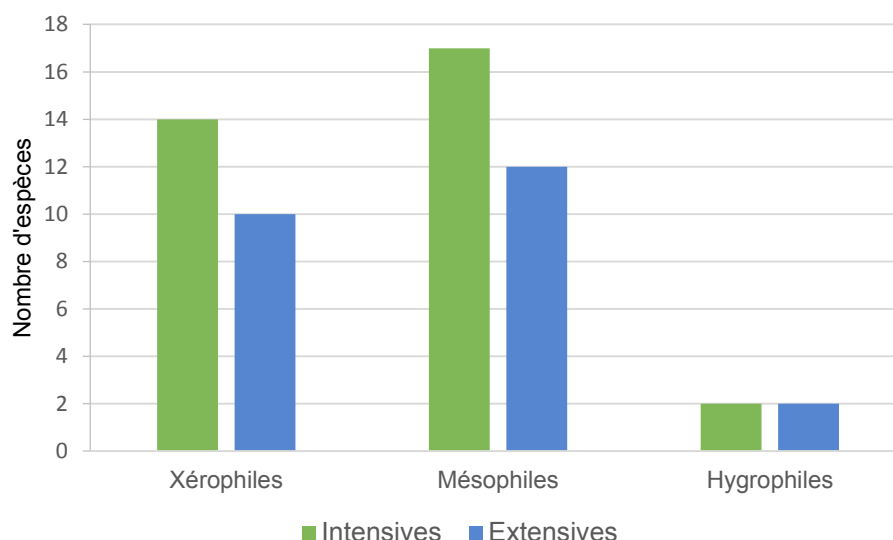


Figure 13. Nombre total moyen d'espèces de carabe par toiture dans chaque type en fonction de leurs préférences en termes d'humidité.

3.2 Entomofaune aérienne

Beaucoup de groupes différents ont pu être identifiés dans les échantillons collectés. Cependant, comparativement aux pièges Barber, le contenu des pièges « Combi » dépend plus fortement de facteurs externes à la toiture comme sa hauteur, son environnement immédiat, la présence d'arbres, etc., ces derniers capturant principalement des insectes en vol. Au total, 5607 individus ont été collectés par les pièges et classés dans 54 groupes taxonomiques différents. Les différents taxons identifiés lors du tri sont détaillés dans l'annexe B.

Les Aphididae et les Diptera comptabilisent plus de 50 % des effectifs. Les Hymenoptera sont également abondants (21% au total) en particulier l'abeille domestique *Apis mellifera* (8%) (Fig. 14). Ce sont les principaux groupes attirés par la couleur jaune du piège.

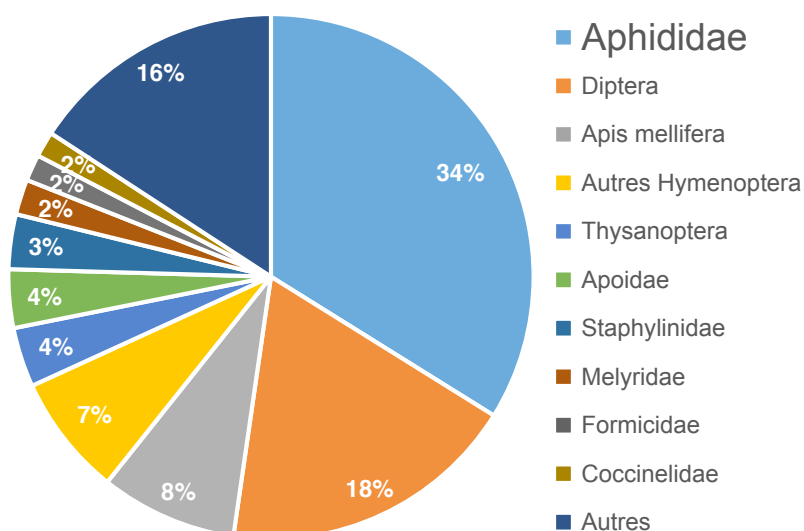


Figure 14. Proportions des principaux taxons identifiés dans les échantillons collectés par les pièges « Combi ».

Malgré le peu de carabes collectés par cette méthode (63) 19 espèces ont tout de même été recensées, c'est-à-dire presque la moitié des espèces récoltées par les pièges Barber. Sur les toitures intensives, malgré un nombre plus faible de toitures échantillonnées, plus d'individus et d'espèces de carabe ont été trouvées (Tab. 1) que sur les toitures extensives. Certaines espèces n'ont pas été capturées dans les pièges Barber : *Amara familiaris*, *Diachromus germanus* et *Syntomus truncatellus*.

Tableau 1 : Espèces de Carabidae (Coleoptera) identifiées et leur nombre total observé dans les pièges « Combi » sur six toitures extensives (EXT) et quatre intensives (INT), et leur total (TOT).

Espèces	EXT	INT	TOT
<i>Acupalpus flavicollis</i>	1	0	1
<i>Amara aenea</i>	2	0	2
<i>Amara familiaris</i>	1	0	1
<i>Amara lucida</i>	0	2	2
<i>Amara ovata</i>	0	1	1
<i>Anisodactylus binotatus</i>	0	1	1
<i>Bembidion lunulatum</i>	1	1	2
<i>Bembidion properans</i>	0	1	1
<i>Diachromus germanus</i>	0	1	1
<i>Harpalus subcylindricus</i>	0	1	1
<i>Harpalus rubripes</i>	0	6	6
<i>Harpalus serripes</i>	2	0	2
<i>Harpalus stignaticornis</i>	0	3	3
<i>Microlestes minutulus</i>	1	0	1
<i>Parophonus maculicornis</i>	1	1	2
<i>Stenolophus teutonius</i>	1	2	3
<i>Syntomus truncatellus</i>	0	1	1
<i>Tachys bistriatus</i>	4	2	6
<i>Tachyura parvula</i>	10	16	26
Totaux	24	39	63
Richesse spécifique	10	14	19

3.3 Interactions entre l'entomofaune, la végétation et le substrat

Le Tableau 2 montre les valeurs de corrélation entre chaque paramètre sélectionné pour l'entomofaune, la végétation et le substrat au printemps 2014. Plusieurs paramètres sont globalement corrélés significativement entre eux soient: Arth, Car, Rich_Car, Rec_PV, Rich_PV, Ep_SUB, Stra¹. Deux paramètres sont généralement négativement corrélés avec ces paramètres : Rec_Bry, Rich_Bry², et parfois de manière significative (Rich_Bry avec Rec_PV, Ep_SUB et Stra). Trois paramètres du substrat (Rap_C/N, Pc_MO et pH³), ne sont jamais corrélés de manière significative avec des paramètres liés à la végétation ou l'entomofaune. Il y a uniquement une corrélation significativement négative entre Pc_MO et

¹ Arth = Nombre d'arthropodes moyen par piège, Car = Nombre de Carabidae moyen par piège, Rich_Car = Richesse spécifique en Carabidae, Rec_PV = Pourcentage de recouvrement des plantes vasculaires, Rich_PV = Richesse spécifique des plantes vasculaires, Ep_SUB = Epaisseur du substrat, Stra = Nombre de strates de végétation

² Rec_Bry = Pourcentage de recouvrement des bryophytes, Rich_Bry = Richesse spécifique des Bryophytes

³ Rap_C/N = Rapport Carbone/Azote, Pc_MO = Pourcentage de matière organique, pH = Valeur du pH

Rap_C/N. Ces trois paramètres ne seront pas intégrés à l'ACP étant donné qu'aucune relation n'existe entre eux et les autres paramètres testés.

Trois paramètres sont toujours corrélés de manière significative aux paramètres de l'entomofaune. Les deux premiers sont Rec_PV et Rich_PV liés à la végétation et le dernier Ep-SUB lié au substrat. Stra est également toujours corrélé positivement aux paramètres de l'entomofaune. Au printemps 2015 (Tableau 3), les valeurs de corrélation sont relativement similaires pour l'ensemble des paramètres. Les trois paramètres décrits ci-dessous corrélés à l'entomofaune le sont toujours positivement mais de manière moins significative qu'en 2014 en particulier pour Ep_SUB.

Pour les deux ACP effectuées (printemps 2014 et 2015), les deux premières composantes ont été retenues expliquant respectivement 67 et 59 % de l'inertie des variables (c. f. Annexe E). Une grande partie de l'inertie restera donc inexpliquée.

La représentation des scores des toitures et de la contribution des variables est illustrée sur les diagrammes des Figures 15 et 16. En 2014 et 2015 la première composante (axe des x, Figure 15) distingue deux groupes de variables : Rec_Bry et Rich_Bry (en négatif) ainsi que le reste (en positif). La variable la mieux corrélée sur les deux années est Rec_PV.

La deuxième composante (axe de y) distingue Ep_SUB, Stra et Rec_PV du reste des variables. Rich_PV est la variable la plus proche des paramètres liés à l'entomofaune mais sa contribution n'est pas très importante (0.2-0.3 pour x et y).

Les différentes catégories de toitures (fonction du type et de l'âge) se différencient relativement bien selon les deux composantes principales (Figure 16). La première composante distingue les toitures intensives (positif) des extensives (négatif), exception faite pour les toitures de l'Europe et de l'Ecole des Petites Fontaines qui sont en positif.

Les toitures intensives possèdent donc des valeurs élevées des variables en positif sur la première composante (p. ex. Rec_PV, Ep_SUB) contrairement à la plupart des extensives. Les toitures extensives ont par contre des valeurs élevées de Rec_Bry et Rich_Bry. Les trois toitures de l'Europe se distinguent des autres, ce résultat intéressant est principalement lié à leur valeurs élevées des paramètres en lien avec l'entomofaune (Car, Rich_Car et Arth) et à des valeurs moins importantes de Ep_SUB, Stra et Rec_PV que les toitures intensives. La plupart des toitures de moins de 10 ans possèdent des valeurs faibles pour la plupart des paramètres, si ce n'est pour Rec_Bry. Certaines de plus de 10 ans, se distancient un peu de celles-ci par des valeurs plus importantes en lien avec l'entomofaune et Rich_Bry. Les toitures intensives de moins de 10 ans se distinguent généralement de celles de plus de 10 ans selon la deuxième composante et donc plutôt en lien avec les paramètres de l'entomofaune plus importants.

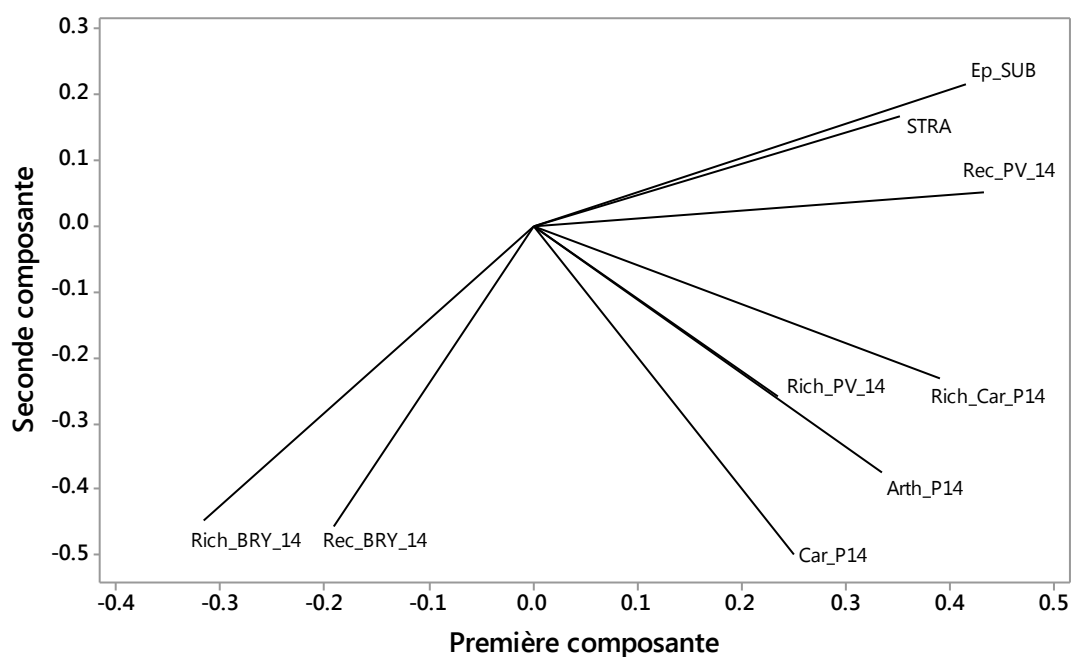
Tableau 2. Coefficients de corrélation des rangs de Spearman de différents paramètres relatifs à l'entomofaune, la végétation et le substrat au printemps 2014. Les valeurs en gras signifient une corrélation significative ($p < 0.05$).

Paramètres	Arth	Car	Rich_Car	Rec_Bry	Rec_PV	Rich_PV	Rich_Bry	Rap_C/N	Pc_MO	pH	Ep_SUB	Stra
Arthropodes	1											
Carabidae	0.66	1										
Richesse Carabidae	0.61	0.80	1									
Recouvrement Bryophytes	-0.20	-0.11	-0.07	1								
Recouvrement Plantes Vasculaires	0.66	0.55	0.71	-0.39	1							
Richesse Plantes vasculaires	0.47	0.41	0.40	0.12	0.33	1						
Richesse Bryophytes	-0.21	-0.11	-0.33	0.53	-0.59	0.01	1					
Rapport C/N	0.08	0.25	0.11	-0.33	0.10	0.06	-0.18	1				
Pourcentage de MO	-0.03	-0.08	0.09	-0.06	0.28	0.24	-0.21	-0.61	1			
pH	-0.26	-0.03	-0.04	0.19	-0.27	-0.21	0.01	-0.37	0.12	1		
Epaisseur du substrat	0.61	0.51	0.69	-0.28	0.76	0.13	-0.64	-0.04	0.22	0.10	1	
Nombres de strates	0.55	0.22	0.34	-0.35	0.61	0.48	-0.55	0.08	0.44	-0.31	0.57	1

Tableau 3. Coefficients de corrélation des rangs de Spearman de différents paramètres relatifs à l'entomofaune, la végétation et le substrat au printemps 2015. Les valeurs en gras signifient une corrélation significative ($p < 0.05$).

Paramètres	Arth	Car	Rich_Car	Rec_Bry	Rec_PV	Rich_PV	Rich_Bry	Rap_C/N	Pc_MO	pH	Ep_SUB	Stra
Arthropodes	1											
Carabidae	0.31	1										
Richesse Carabidae	0.29	0.62	1									
Recouvrement Bryophytes	-0.08	-0.10	-0.24	1								
Recouvrement Plantes Vasculaires	0.55	0.25	0.41	-0.49	1							
Richesse Plantes Vasculaires	0.44	0.49	0.26	-0.19	0.45	1						
Richesse Bryophytes	-0.39	0.00	0.15	0.41	-0.50	-0.11	1					
Rapport C/N	-0.19	0.09	0.20	-0.27	-0.07	-0.08	-0.04	1				
Pourcentage de MO	0.14	0.01	0.13	-0.06	0.37	0.33	-0.09	-0.50	1			
pH	-0.01	-0.13	-0.40	0.17	-0.19	-0.15	-0.14	-0.40	0.06	1		
Epaisseur du substrat	0.62	0.32	0.34	-0.30	0.79	0.36	-0.65	-0.15	0.26	0.19	1	
Nombres de strates	0.54	0.32	0.16	-0.26	0.66	0.68	-0.59	-0.12	0.43	-0.11	0.67	1

Contributions des variables - ACP - printemps 2014



Contributions des variables - ACP - printemps 2015

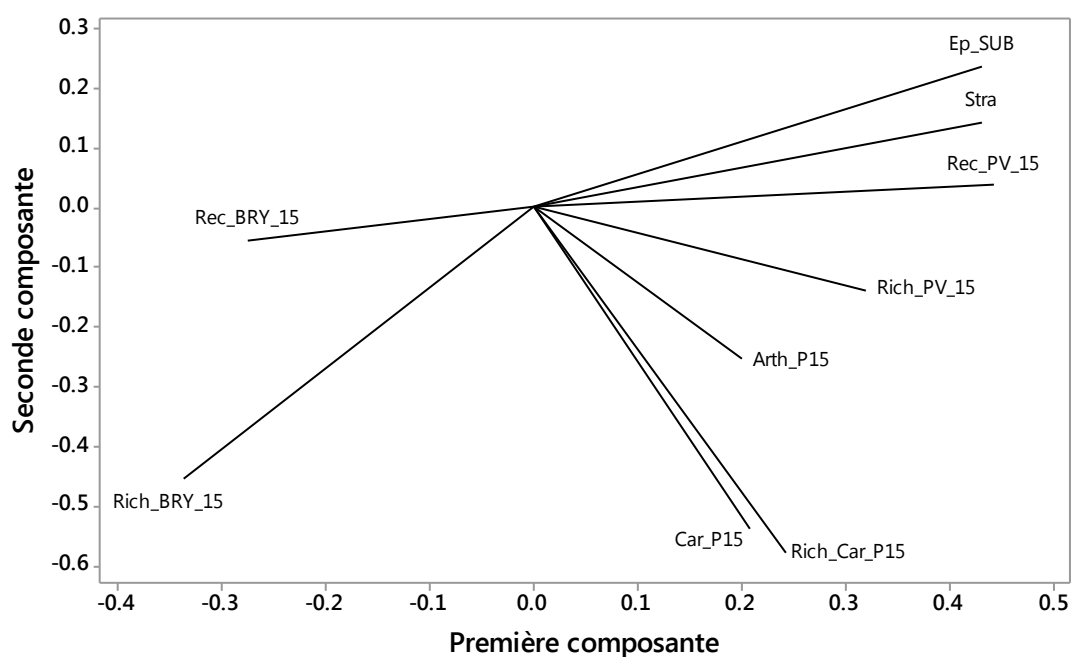


Figure 15. Diagrammes des contributions des variables (paramètres) sur les axes des deux premières composantes principales pour les printemps 2014 et 2015.

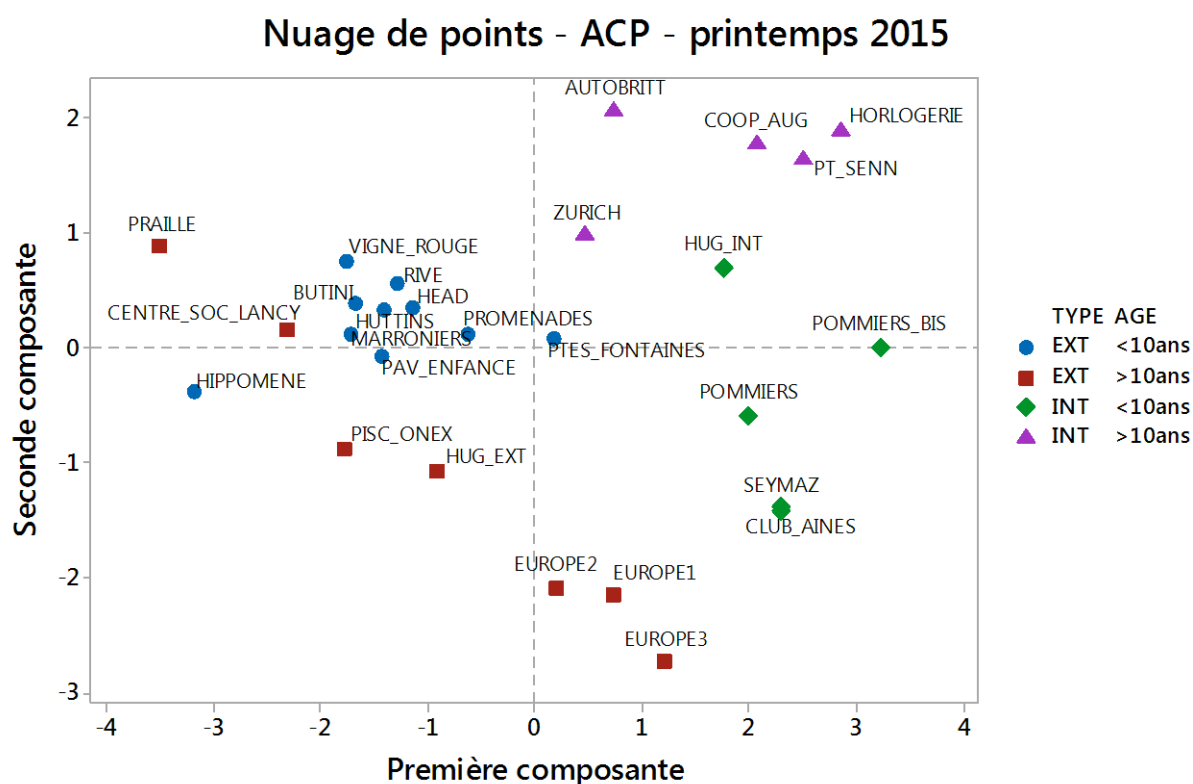
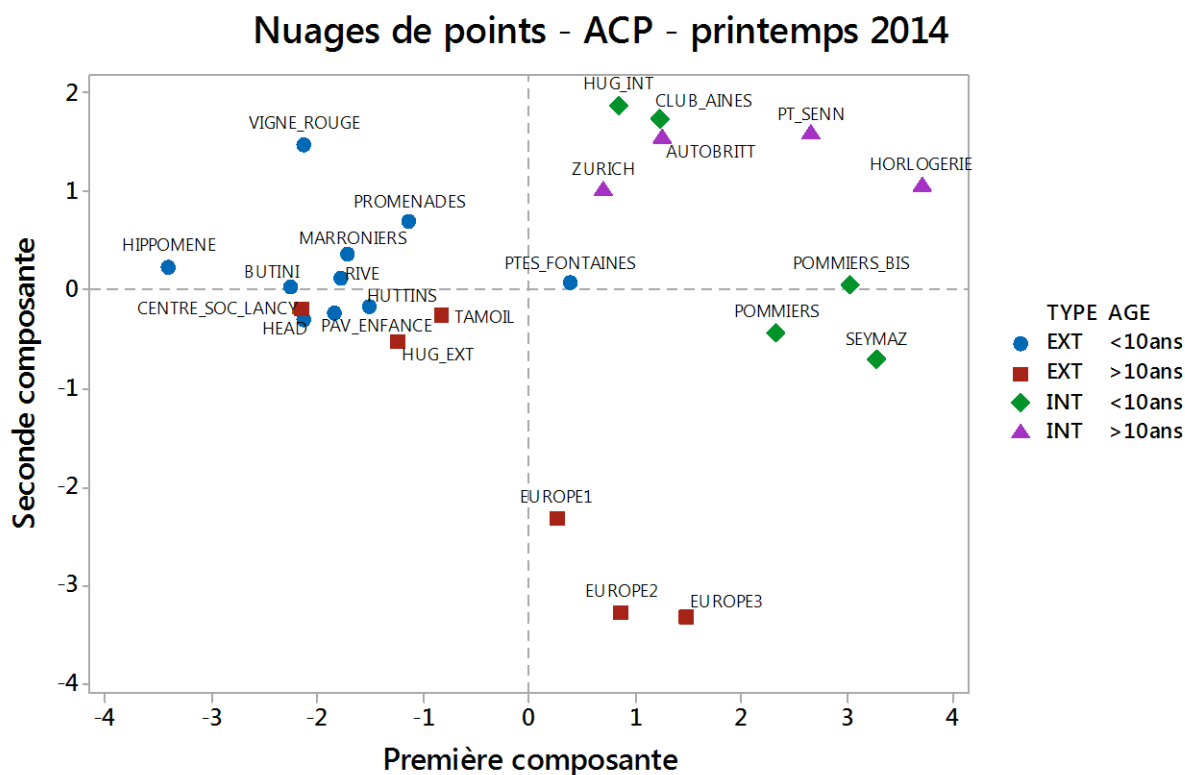


Figure 16. Diagrammes des scores (toitures) sur les axes des deux premières composantes principales pour les printemps 2014 et 2015.

4. Discussion

4.1 Arthropodes

De manière générale, l'abondance des arthropodes sur les toitures intensives de l'étude était plus importante que sur les toitures extensives. Ceci serait dû à l'épaisseur plus importante du substrat (Brenneisen 2003) ainsi qu'au taux de recouvrement plus important de la végétation (Schindler et al. 2011). Des différences ont également été décelées selon l'âge des toitures. En effet, il a été observé qu'au printemps plus une toiture extensive est âgée, plus le nombre d'arthropodes, de prédateurs et de décomposeurs augmente. Après 10 ans la toiture a eu le temps d'évoluer, de voir son substrat se modifier et la végétation s'installer. Un plus grand nombre d'arthropodes sur les toitures extensives de plus de 10 ans peut s'expliquer notamment car certaines toitures de cette catégorie (toitures n° 15, 16 et 17) présentaient des caractéristiques très différentes (substrat plus profond, plus organique, végétation plus abondante, etc.) par rapport aux autres toitures extensives. A l'inverse, plus une toiture intensive évolue dans le temps moins il y a d'arthropodes, de prédateurs et de décomposeurs. Ce phénomène peut être lié au fait qu'il faut un certain temps à la végétation pour se développer sur les toitures extensives alors qu'elle est très vite abondante sur les toitures intensives mais peut rapidement s'appauvrir si elle n'est pas correctement entretenue. Une cause également probable de cette différence réside dans le fait que trois des cinq toitures intensives de moins de 10 ans échantillonnées possèdent un substrat à épaisseurs variables (créant différentes conditions de milieu) qui, selon Brenneisen (2003) est une caractéristique favorisant la diversité des arthropodes. Ceci n'a pas été observé sur les toitures intensives de plus de 10 ans. Enfin, cette différence peut également être liée à la variabilité observée entre les toitures (substrat, semis, structure, etc.) et ce au sein d'une même catégorie (type et d'âge de toiture).

Sur les deux types de toitures échantillonnés, les groupes d'arthropodes sont globalement similaires. La présence des cloportes (Isopoda) et d'une plus importante proportion de fourmis et d'acariens sur les toitures intensives illustre le fait que ces groupes nécessitent un substrat très organique et/ou une végétation plus abondante que les autres groupes pour pouvoir subsister. Les fourmis semblent jouer notamment un rôle important dans la différence observée du nombre d'arthropodes entre les toitures intensives et extensives. Pour les collemboles, ils ne semblent pas sensibles à ces paramètres (substrat et végétation) et se développent très bien dans des substrats plus minéraux tels que retrouvés sur les toitures extensives. Toutefois, il est possible que les communautés de collemboles diffèrent entre les toitures intensives et extensives, mais la présente étude n'ayant pas procédé à l'identification jusqu'à l'espèce, elle ne permet pas de le vérifier.

4.2 Carabidae

Parmi les arthropodes, la famille des Carabidae, bons bioindicateurs a été étudiée plus en détail dans cette étude. La communauté carabique présente sur les toitures végétalisées genevoises totalise pratiquement le même nombre d'espèces que celles comptabilisées sur les toitures zurichoises (Braaker et al. 2014). En effet, 45 espèces y avaient été collectées contre 41 lors de la présente étude. Les deux listes d'espèces se recoupent à 70.7 % , attestant d'une certaine homogénéité d'espèces présentes sur ce type d'infrastructure. En comparaison, l'étude sur les toitures végétalisées de Londres n'a recensé que 20 espèces de carabes (Kadas 2006). Huit d'entre elles ont également été collectées à Genève dont deux considérées comme menacées en Grande-Bretagne mais très abondantes en Suisse.

Elles ont d'ailleurs été capturées en nombre important sur les toitures genevoises. Il s'agit de *Harpalus tardus* et *Microlestes minutulus*.

La communauté carabique présente sur les toitures végétalisées montre une préférence pour les milieux secs tout en ayant une majorité d'espèces dites mésophiles, c'est-à-dire sans préférence pour des conditions d'humidité particulières. Même si beaucoup d'espèces recensées sont eurytopes et communes dans les milieux ouverts, les préférences xérophiles (de milieux secs) d'environ 40 % des espèces, la présence de deux espèces sur la liste rouge suisse et la découverte d'une nouvelle espèce pour le canton, montre que les toitures végétalisées représentent un milieu sec particulier dans le contexte urbain et confirme leur intérêt en temps que support d'une biodiversité spécifique (Luka et al. 2009).

Les richesses spécifiques et les densités d'activité des carabes sont généralement plus importantes sur les toitures intensives qu'extensives (significatif pour la richesse au printemps 2014). Il y a particulièrement peu d'espèces différentes sur les toitures extensives de moins de 10 ans, où la végétation est encore peu développée et où les espèces n'ont peut-être pas encore pu coloniser ce milieu. La grande variabilité des richesses sur les toitures intensives de moins de 10 ans est probablement due au phénomène de colonisation car les toitures comprises dans cette catégorie peuvent avoir des âges très variables (entre 0 et 10 ans) et sont donc à des stades de colonisation différents. Une autre raison pourrait être liée à des facteurs externes à la toiture (hauteur, environnement direct, etc.) ou à des facteurs internes liés au substrat et/ou à la végétation.

A chaque période, l'indice de similarité de Jaccard situé entre 39 et 48 % montre que les communautés entre les différents types de toitures sont passablement différentes et que la présence des deux types de toitures dans l'espace urbain est requise pour favoriser un maximum la diversité carabique. Cependant, il est surprenant que les toitures extensives n'abritent pas plus d'espèces xérophiles (milieux secs) que les intensives qui créent un milieu plus humide grâce à une végétation dense et à un substrat plus organique.

4.3 Entomofaune aérienne

Les résultats présentés dans cette partie sont donnés à titre indicatif et descriptif. Car pour approfondir l'analyse, il aurait été intéressant de mettre les résultats en lien avec l'environnement externe à la toiture ; l'entomofaune aérienne étant moins liée au couvert végétal de la toiture que l'entomofaune épigée (du sol). Cependant, de nombreuses familles ont pu être identifiées et trois espèces de carabes non collectées par les pièges Barber ont été récoltées. Les données des carabes montrent quand même que ceux-ci semblent plus abondants et diversifiés sur les toitures intensives, phénomène déjà observé par le piégeage au sol.

Parmi les 5607 individus collectés, 12 % font partie de la super famille des Apoidea dont 8 % de l'espèce *Apis mellifera*, c'est-à-dire environ deux tiers. Sur une toiture végétalisée de la ville de Lausanne, une étude a également montrée qu'entre 48 et 67 % des Apoidae capturés étaient des abeilles mellifères (n+p 2015). Cette proportion élevée pose la question de la compétition entre cette espèce et les abeilles sauvages. Il semblerait qu'elle puisse être problématique avec l'installation d'une densité trop élevée de ruches en milieu urbain (Vereecken et al. 2015). En effet, les ressources en nectar et en pollen sont limitées en milieu urbain (espace verts, balcons, jardins individuels) et la tendance à l'installation de ruches en ville de plus en plus importante dans les jardins individuels, sur les toits de grandes entreprises, dans les espaces verts, etc. Les présents résultats montrent la prédominance de l'abeille domestique sur les toitures végétalisées et, de ce fait, également l'attractivité des toitures végétalisées en tant que support de ressources pour les abeilles

grâce à la flore qui les compose. La faible diversité des communautés d'abeilles recensées sur les toits comparées à celles des prairies et des espaces verts urbains, pointe la nécessité de planter des espèces indigènes adaptées, fournissant des ressources de butinage importantes et diversifiées (Colla et al. 2009 ; Tonietto et al. 2011).

4.4 Interactions avec la végétation et le substrat

Les corrélations entre les différents paramètres ainsi que les deux ACP permettent de voir certaines interrelations qui existent entre le substrat, la végétation et l'entomofaune. L'entomofaune semble être spécifiquement influencée par le recouvrement et la richesse en plantes vasculaires ainsi que par l'épaisseur du substrat et le nombre de strates de végétation alors qu'elle a une relation négative avec les paramètres liés aux bryophytes. Ce constat rejoint celui de Schindler et al. (2011) en ce qui concerne le recouvrement de la végétation ainsi que celui de Brenneisen (2003) vis-à-vis de l'épaisseur du substrat, deux facteurs significativement corrélés entre eux (Tableaux 2 et 3). Les autres paramètres liés au substrat ne semblent pas présenter de relation avec l'entomofaune. Une épaisseur de substrat importante qui permet un bon recouvrement des plantes vasculaires et un développement diversifié avec plusieurs strates de végétation semble donc être la « clé-de-voûte » d'une toiture favorisant au mieux la diversité et l'abondance des arthropodes en général et plus spécifiquement du groupe indicateur choisi : les carabes.

Les résultats présentant la répartition des toitures suivant les deux premières composantes des ACP, montrent des différences importantes entre les toitures intensives et extensives vis-à-vis de la plupart des paramètres choisis. Contrairement aux autres toitures extensives, celles du collège de l'Europe se distinguent aussi bien par la première que la deuxième composante. Ces toitures se rapprochent des intensives selon la première composante (en particulier selon certains paramètres tels que le recouvrement en plantes vasculaires ou l'épaisseur du substrat). Mais elles se différencient de ces dernières suivant la deuxième composante plus liée aux carabes et aux bryophytes. Ces toitures favorisent donc un maximum la biodiversité en particulier pour l'entomofaune mais également pour les bryophytes et les plantes vasculaires et ceci grâce à un substrat relativement épais et à une gestion extensive.

Il n'a pas été possible de tenir compte dans cette analyse des toitures possédant des substrats d'épaisseur variable, élément important qui selon Brenneisen (2006) entraîne la colonisation de la toiture par une faune et une flore plus diversifiée, elles-mêmes favorisées par la diversification des microhabitats ainsi créés..

5. Conclusion

Les toitures végétalisées intensives et extensives abritent des arthropodes et des communautés carabiques relativement différentes et méritent donc autant les unes que les autres une place dans l'espace urbain en tant que support de biodiversité. Cependant, de manière générale les toitures intensives abritent une entomofaune plus abondante et diversifiée que les toitures extensives car ces dernières ayant été parfois mal conçues, la végétation peine à s'installer à cause notamment d'une épaisseur du substrat trop mince. Dans ce cas de figure, la mise en place de telles toitures n'est pas intéressante dans le but d'établir des d'habitats urbains alternatifs bénéfiques à la biodiversité. Pour favoriser l'établissement d'une diversité entomologique, une toiture végétalisée devrait respecter les critères suivant : 1) un substrat profond (> 12 cm), à épaisseurs variables, composé en partie de matière organique et 2) la présence de différentes strates de végétation ainsi que le semis de plantes indigènes variées (offrant une diversification des ressources florales pour les pollinisateurs). Selon notre étude, l'exemple d'une « bonne » toiture végétalisée qui favorise la biodiversité entomologique serait les trois toitures végétalisées du collège de l'Europe qui présentent, un substrat, une végétation et une entomofaune intéressants à l'instar de beaucoup de toitures extensives où la végétation et l'entomofaune peinent à s'installer. Sur ces toitures sont recrées ce que l'on peut considérer comme des prairies sèches artificielles, favorisant la biodiversité en milieu urbain en abritant notamment une communauté carabique xérophile diversifiée. La prise en compte de paramètres externes à la toiture comme la proximité de divers structures végétales (espaces verts, arbres, prairies, etc.) ou d'autres toitures végétalisées, la hauteur de la toiture ou encore son emplacement dans l'organisation du tissu urbain n'a pu être entreprise par manque de données pour leur calcul. Ces derniers paramètres ont pourtant une influence probable sur l'entomofaune même si Braaker et al. (2014) montrent que les carabes sont principalement influencés par des facteurs locaux (% de sol nu, proportion de plantes dycotylédones).

Cependant, les toitures végétalisées ne semblent pas pouvoir se substituer aux autres habitats urbains mais plutôt compléter ceux-ci. En effet, plusieurs études montrent que les diversités de différents groupes d'arthropodes restent supérieures au niveau du sol dans divers habitats urbains (espaces verts, rocailles avec végétation spontanée, etc.) comparativement aux toitures végétalisées (Williams 2014). Selon Rumble & Gange (2013), la communauté des microarthropodes (p. ex. les collembolés) présents sur les toitures extensives conventionnelles (avec une végétation principalement composée de *Sedum spp.*) est très pauvre et couplée avec un faible développement de la faune et de la flore. Cependant, une étude menée par Kadas (2006) qui comparait des toitures végétalisées à des terrains abandonnés (friches urbaines) parle d'une richesse plus importante d'espèces menacées sur les toitures. Toutefois, les communautés présentes sur les toitures végétalisées ne semblent pas pouvoir donner un réplica de celles retrouvées dans les habitats urbains même si très peu d'études ont pu démontrer ce phénomène (Williams 2014). La grande variabilité structurale des toitures et la diversité des habitats urbains rendent ce constat difficile à démontrer. La composition des groupes d'arthropodes sur les toitures intensives semblent correspondre à celles des d'habitats urbains standards présents dans les espaces verts (pelouses, haies, prairies). Les toitures extensives conventionnelles génèrent une faible biodiversité et ne correspondent à aucun habitat urbain. Une toiture extensive plus diversifiée au niveau de la végétation et du substrat aura tendance à se rapprocher de la composition d'une friche urbaine et d'abriter une entomofaune riche et diversifiée.

Les résultats relatifs à l'entomofaune aérienne montre que les toitures représentent une ressource importante pour les pollinisateurs (Apoidea). Cette étude a permis de révéler la

prédominance de l'abeille mellifère dans le contexte urbain et donc de soulever la question de la compétition avec les abeilles sauvages pour les ressources procurées par ce type d'aménagement due à l'implantation de plus en plus importante de ruches en zone urbaine. A Lausanne, 34 espèces d'abeilles sauvages ont pu être identifiées sur une toiture végétalisée dont 5 inscrite sur la liste rouge suisse (n+p 2015). Si le temps et les compétences l'avaient permis, il aurait été pertinent d'identifier les espèces d'abeilles sauvages récoltées par les pièges « Combi » afin de les comparer à d'autres études (Colla et al. 2009 ; Tonietto et al. 2011 ; Braaker et al. 2014 ; n+p 2015) et d'acquérir ainsi plus d'informations relatives à l'attractivité florale des toitures étudiées. La prise de données sur une deuxième saison d'échantillonnage serait également intéressante pour augmenter l'exhaustivité des données.

Face à une toiture non-végétalisée, le gain en termes de biodiversité est évident malgré un faible apport des toitures extensives conventionnelles comme le démontre Williams (2014). Cependant les présents résultats montrent l'intérêt de la mise en place d'une stratégie de verdissement réfléchi des toitures végétalisées prenant en compte la nature et l'épaisseur du substrat ainsi que la composition de la végétation semée lors de la création de la toiture. Mûr de ce constat, l'établissement de directives d'implantation et d'entretien d'une toiture végétalisée paraissent indispensable pour favoriser au mieux la biodiversité urbaine.

6. Bibliographie

- Braaker, S., Ghazoul, J., Obrist, M. K., & Moretti, M. (2014). Habitat connectivity shapes urban arthropod communities: the key role of green roofs. *Ecology*, 95(4): 1010-1021.
- Brenneisen, S. (2003). *Ökologisches Ausgleichspotenzial von extensiven Dachbegrünungen—Bedeutung für den Arten- und Naturschutz und die Stadtentwicklungsplanung*. Doctoral dissertation, Institute of Geography, University of Basel, Switzerland.
- Brenneisen, S. (2006). Space for urban wildlife: designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban Habitats*, 4(1), 27-36.
- Colla, S. R., Willis, E., & Packer, L. (2009). Can green roofs provide habitat for urban bees (Hymenoptera: Apidae)? *Cities and the Environment (CATE)*, 2(1), 4.
- Greenslade, P. J. M. (1964). Pitfall trapping as a method for studying populations of Carabidae (Coleoptera). *Journal of Animal Ecology* : 301-310.
- Hollander, M., & Wolfe, D. A. (1973). *Nonparametric Statistical Methods*. New York, NY, USA ; John Wiley & Sons.
- Huber C., & Marggi, W. (2005). Raumbedeutsamkeit und Schutzverantwortung am Beispiel der Laufkäfer der Schweiz (Coleoptera, Carabidae) mit Ergänzungen zur Roten Liste. *Mitteilungen der Schweizerischen entomologischen Gesellschaft*, 78: 375–397.
- Jones, E. L., & Leather, S. R. (2013). Invertebrates in urban areas: a review. *European Journal of Entomology*, 109(4), 463-478.
- Luff, M. L. & Turner, J. (2007). *The Carabidae (ground beetles) of Britain and Ireland*. Vol. 4, Part 2 (2nd Ed.), Royal Entomological Society, UK.
- Luka H., Marggi W., Huber C., Gonseth Y. & Nagel P. (2009). Carabidae, Ecology – Atlas. *Fauna Helvetica*, 24, CSCF & SEG, Neuchâtel. 677 pp.
- Kadas, G. (2006). Rare invertebrates colonizing green roofs in London. *Urban habitats*, 4(1), 66-86.
- Kotze, D. J., Brandmayr, P., Casale, A., Dauffy-Richard, E., Dekoninck, W., Koivula, M. J., ... & Pizzolotto, R. (2011). Forty years of carabid beetle research in Europe—from taxonomy, biology, ecology and population studies to bioindication, habitat assessment and conservation. *ZooKeys*, (100), 55.
- MacIvor, J. S., & Lundholm, J. (2011). Insect species composition and diversity on intensive green roofs and adjacent level-ground habitats. *Urban Ecosystems*, 14(2), 225-241.
- Madre, F., Vergnes, A., Machon, N., & Clergeau, P. (2013). A comparison of 3 types of green roof as habitats for arthropods. *Ecological Engineering*, 57, 109-117.
- Marggi, W. (2012). Caraboidea. In: Liste annotée des insectes (Insecta) du canton de Genève. Merz B. (ed.), *Instrumenta Biodiversitatis*, 8 : 90-97.
- Meierhofer, D. (2013). Ground beetles (Carabidae) on San Francisco green roofs. *Cities alive: 11th Annual Green Roofs and Wall Conference*. Green Roofs for Healthy Cities, San Francisco, CA.
- Müller-Motzfeld, G. G. (ed.) (2004). *Adephaga 1: Carabidae (Laufkäfer)*. In Freude, H., Harde, K.W., Lohse, G.A. & Klausnitzer, B. (eds). *Die Käfer Mitteleuropas*. Vol. 2 (2^{ème} ed.), Elsevier-Spektrum, Akademischer Verlag, München.

- n+p (2015). Suivi entomologique d'une toiture végétalisée du complexe de Beaulieu. SPADOM, Lausanne, 22pp.
- Rainio, J., & Niemelä, J. (2003). Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators. *Biodiversity & Conservation*, 12(3), 487-506.
- Rumble, H., & Gange, A. C. (2013). Soil microarthropod community dynamics in extensive green roofs. *Ecological Engineering*, 57, 197-204.
- Schindler, B. Y., Griffith, A. B., & Jones, K. N. (2011). Factors influencing arthropod diversity on green roofs. *Cities and the Environment (CATE)*, 4(1): 5.
- Tonietto, R., Fant, J., Ascher, J., Ellis, K., & Larkin, D. (2011). A comparison of bee communities of Chicago green roofs, parks and prairies. *Landscape and Urban Planning*, 103(1), 102-108.
- Trautner, J. & Geigenmüller, K. (1987). *Tiger beetles, ground beetles. Illustrated key to the Cicindelidae and Carabidae of Europe*. TRIOPS, Verlag.
- Vereecken, N. J., Dufrêne, E., Aubert, M. (2015). Sur la coexistence entre l'abeille domestique et les abeilles sauvages. Rapport de synthèse sur les risques liés à l'introduction de l'abeille domestique (*Apis mellifera*) vis-à-vis des abeilles sauvages et de la flore. Observatoire des Abeilles (OA), accessible sur www.oabeilles.net
- Williams, N. S., Lundholm, J., & Scott MacIvor, J. (2014). Do green roofs help urban biodiversity conservation? *Journal of Applied Ecology*, 51(6), 1643-1649.

Annexes

Annexe A

Classification des arthropodes des pièges Barber

Classe	Sous-classe	Ordre	(Super-) Famille
Arachnida	Palpigradi	Araneae	
Arachnida	Dromopoda	Opiliones	
Arachnida	Acari		
Collembola			
Thysanoptera			
Psocoptera			
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Aleyrodoidea
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Alydidae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Anthocoridae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Aphididae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Cercopoidea
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Cixiidae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Coreidae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Cydnidae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Lygaeidae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Miridae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Nabidae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Pentatomidae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Phymatidae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Piesmatidae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Psylloidea
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Reduviidae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Saldidae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Tingidae
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Autres
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Bruchidae
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Carabidae*
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Chrysomelidae
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Coccinellidae
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Curculionidae
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Elateridae
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Histeridae
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Lycaneidae
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Nitidulidae
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Scarabeidae
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Staphylinidae
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Autres
Insecta	Pterygota	Hymenoptera	Apidoidea
Insecta	Pterygota	Hymenoptera	Vespidae
Insecta	Pterygota	Hymenoptera	Autres
Insecta	Pterygota	Diptera	Syrphidae
Insecta	Pterygota	Diptera	Autres
Insecta	Pterygota	Blattoptera	Blattidae
Insecta	Pterygota	Orthoptera	
Insecta	Pterygota	Trichoptera	
Insecta	Pterygota	Dermaptera	
Malacostraca	Eumalacostraca	Isopoda	
Chilopoda			
Diplopoda			

*Dans cette famille les individus ont été identifiés à l'espèce

Annexe B

Classification des arthropodes des pièges à interception

Classe	Sous-classe	Ordre	(Super-) Famille	Genre/ espèce
Arachnida	Palpigradi	Araneae		
Arachnida	Acari			
Thysanoptera				
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Anthocoridae	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Aphididae	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Tingidae	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Cercopidae	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Chrysopidae	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Cidacellidae	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Geocoridae	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Lygaeidae	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Miridae	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Nabidae	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Pentatomidae	<i>Nezara viridula</i>
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Psylloidea	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Reduviidae	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Rhopalidae	
Insecta	Pterygota	Hemiptera	Autres	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Bruchidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Cantharidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Carabidae*	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Cerambycidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Cetoniidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Chrysomelidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Coccinellidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Curculionidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Dermestidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Dystichidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Elaterydae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Eucinetidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Histeridae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Lathridiidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Meloidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Melyridae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Mordellidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Nitidulidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Oedemeridae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Psealphidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Ptiliidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Scaraboidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Scolytidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Silphidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Staphylinidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Trogossitidae	
Insecta	Pterygota	Coleoptera	Autres	
Insecta	Pterygota	Hymenoptera	Apidae	<i>Apis mellifera</i>
Insecta	Pterygota	Hymenoptera	Apidae	<i>Bombus sp.</i>
Insecta	Pterygota	Hymenoptera	Apidae	
Insecta	Pterygota	Hymenoptera	Formicidae	
Insecta	Pterygota	Hymenoptera	Symphyta (sous-ordre)	
Insecta	Pterygota	Hymenoptera	Vespidae	
Insecta	Pterygota	Hymenoptera	Autres	
Insecta	Pterygota	Diptera		
Insecta	Pterygota	Dermaptera		

*Dans cette famille les individus ont été identifiés à l'espèce

Annexe C

Test U de Mann-Withney

Printemps'14		U	p-value	p-value (unilatéral)	
Arth					
INT	EXT	157	0.0253	0.0127	INT > EXT
<10ans	>10ans	156	0.0327	0.0164	<10ans < à >10ans
Pred					
INT	EXT	123	0.7555		
<10ans	>10ans	183	0.5235		
Dec					
INT	EXT	145	0.1195		
<10ans	>10ans	167	0.1272		
Formicidae					
INT	EXT	163	0.012	0.006	INT > EXT
<10ans	>10ans	170	0.174		
Automne'14		U	p-value	p-value (unilatéral)	
Arth					
INT	EXT	162	0.5977		
<10ans	>10ans	170	0.0847	0.0424	<10ans < à >10ans
Pred					
INT	EXT	271.5	0.5507		
<10ans	>10ans	246.5	0.1161		
Dec					
INT	EXT	299.5	0.5206		
<10ans	>10ans	180.5	0.7697		
Printemps'15		U	p-value	p-value (unilatéral)	
Arth					
INT	EXT	198	0.0293	0.0147	INT > EXT
<10ans	>10ans	238	0.5854		
Pred					
INT	EXT	273	0.5977		
<10ans	>10ans	257	0.1692		
Dec					
INT	EXT	155	0.1759		
<10ans	>10ans	208	0.4715		

Annexe D

Liste des espèces de Carabidae collectées dans les pièges Barber

Espèces	Print.14	Aut.14	Print.15	Total	PREF	HUMIDITE
<i>Acupalpus flavicollis</i>	4		1	5	Eurytope	Hygrophile
<i>Agonum muelleri</i>	15	1		16	Eurytope	Mésophile
<i>Amara aenea</i>	92	36	100	228	Eurytope	Xérophile
<i>Amara communis</i>	21	1	4	26	Eurytope	Mésophile
<i>Amara convexior</i>	1			1	Eurytope	Mésophile
<i>Amara fulvipes</i>	9	5		14	Stenotope	Xérophile
<i>Amara kulti</i>	1	3	3	7	Stenotope	Mésophile
<i>Amara lucida</i>	1			1	Stenotope	Mésophile
<i>Amara ovata</i>			2	2	Eurytope	Mésophile
<i>Anchomenus dorsalis</i>	1			1	Eurytope	Mésophile
<i>Anisodactylus binotatus</i>	3	1	1	5	Eurytope	Mésophile
<i>Badister bullatus</i>	2	3	1	6	Eurytope	Mésophile
<i>Bembidion lampros</i>	1			1	Eurytope	Mésophile
<i>Bembidion lunulatum</i>			1	1	Eurytope	Hygrophile
<i>Bembidion obtusum</i>			2	2	Eurytope	Mésophile
<i>Bembidion properans</i>	40	4	70	114	Eurytope	Mésophile
<i>Bembidion quadrimaculatum</i>	11	24	14	49	Eurytope	Xérophile
<i>Brachinus explodens</i>	4			4	Eurytope	Steno-xérophile
<i>Harpalus affinis</i>	147	16	33	196	Stenotope	Mésophile
<i>Harpalus distinguendus</i>	1			1	Stenotope	Xérophile
<i>Harpalus griseus</i>		3		3	Eurytope	Xérophile
<i>Harpalus rubripes</i>	129	17	35	181	Eurytope	Mésophile
<i>Harpalus rufipes</i>	10	34		44	Eurytope	Mésophile
<i>Harpalus serripes</i>	27	1	21	49	Eurytope	Xérophile
<i>Harpalus stignaticornis</i>	1			1	Eurytope	Xérophile
<i>Harpalus subcylindricus</i>	241	6	89	336	Stenotope	Xérophile
<i>Harpalus tardus</i>	13	7	8	28	Eurytope	Xérophile
<i>Microlestes maurus</i>			2	2	Eurytope	Xérophile
<i>Microlestes minutulus</i>	41	10	19	70	Eurytope	Xérophile
<i>Ophonus azureus</i>	5	1	6	12	Stenotope	Xérophile
<i>Parophonus maculicornis</i>	3		2	5	Stenotope	Mésophile
<i>Poecilus cupreus</i>	12	2	2	16	Eurytope	Mésophile
<i>Pterostichus vernalis</i>	2		7	9	Eurytope	Mésophile
<i>Stenolophus teutonius</i>	1	2	1	4	Stenotope	Mésophile
<i>Tachys bistriatus</i>	1			1	Eurytope	Mésophile
<i>Tachyura parvula</i>	118	6	116	240	Eurytope	Xérophile
<i>Tachyura sexstriata</i>	103	5	37	145	Stenotope	Hygrophile
<i>Trechus quadristriatus</i>		1		1	Stenotope	Mésophile
Abondance totale	1061	189	577	1827		
Richesse spécifique	32	23	25	38		

Annexe E

Analyse en composantes principales – Printemps 2014

Analyse des valeurs et vecteurs propres de la matrice de corrélation

Valeur propre	4.1290	1.8583	1.0829	0.6569	0.4286	0.3458	0.2407	0.1797	0.0779
Proportion	0.459	0.206	0.120	0.073	0.048	0.038	0.027	0.020	0.009
Cumulée	0.459	0.665	0.786	0.859	0.906	0.945	0.971	0.991	1.000

Variable	PC1	PC2
NBR_MOY_P14	0.334	-0.376
CARABIDAE_P14	0.250	-0.500
RICH_CARAB_P14	0.389	-0.231
RECOUVREMENT_BRYO	-0.192	-0.456
RECOUVREMENT_PV	0.432	0.053
RICH_PV	0.235	-0.260
RICH_BRYO	-0.316	-0.449
EPAISSEUR_SUB	0.414	0.217
NBR_STRATES	0.352	0.168

Analyse en composantes principales – Printemps 2015

Analyse des valeurs et vecteurs propres de la matrice de corrélation
27 cas utilisés, 2 cas contiennent des valeurs manquantes

Valeur propre	3.7448	1.5383	1.0876	0.9241	0.7204	0.4846	0.2287	0.1705	0.1010
Proportion	0.416	0.171	0.121	0.103	0.080	0.054	0.025	0.019	0.011
Cumulée	0.416	0.587	0.708	0.811	0.891	0.944	0.970	0.989	1.000

Variable	PC1	PC2
NBR_MOY_P15	0.200	-0.254
CARABIDAE_P15	0.208	-0.539
RICH_CARAB_P15	0.242	-0.581
RECOUVREMENT_BRYO	-0.275	-0.056
RECOUVREMENT_PV	0.442	0.037
RICH_PV	0.320	-0.141
RICH_BRYO	-0.336	-0.456
EPAISSEUR_SUB	0.432	0.237
NBR_STRATES	0.432	0.142

Etude des substrats et de l'hydrologie des toitures végétalisées du canton de Genève

RAPPORT FINAL DU PROJET TVEG 2014-2016



Genève, le 12 février 2016

Auteurs :

Marie Fournier, assistante HES
Dr Pascal Boivin, professeur HES

Résumé

Face à une urbanisation croissante, le développement durable, la protection de la biodiversité et la qualité de vie sont des thématiques fortes dans les projets d'urbanisme et d'architecture. Les toitures végétalisées font partie des mesures sollicitées, Genève en compte aujourd'hui plus de 300. Ce projet s'intègre dans cette thématique avec pour objectif un suivi de toitures végétalisées préexistantes en ville de Genève. Le volet substrat et hydrologie propose une caractérisation hydrodynamique et physique des substrats sélectionnés (substrats neufs et substrats de toitures), ainsi qu'une quantification des rétentions en eau et des écoulements par des mesures hydrodynamiques locales et un suivi temporel des réserves en eau.

Pour le fonctionnement hydrologique, 5 toitures extensives ont été suivies en continu durant la période de végétation 2015 d'avril à septembre. Les mesures de débits ont été réalisées via la mise en place de déversoirs en V cylindriques développés à cette fin et placés directement dans les bouches d'évacuation sur le toit. Trois sondes watermark®, analysant l'état hydrique du substrat, ont été installées à différentes profondeurs.

Les toitures extensives étudiées abattent de 45 à 63 % des précipitations reçues, démontrant leur intérêt dans la gestion des eaux urbaines. L'évapotranspiration réelle (ETR) a également pu être estimée, avec une moyenne mesurée à 1.48 mm jour⁻¹.

Vingt-huit substrats de toitures ainsi que 4 substrats neufs ont pu être étudiés au travers d'analyses chimiques (capacité d'échange cationique, carbone et azote organique, rapport C/N, matière organique, pH et analyses de fertilité (P, K, Mg, Ca) et d'analyses physiques (granulométrie, rétention en eau, porosité). Ces dernières, réalisée via les protocoles des associations professionnelles (ASVE, ADIVET) ont été confrontées à des mesures de laboratoire plus précises (désorption en continu). Il semble que les protocoles standards introduisent des biais peu explicables et doivent être révisés. Une rétention en eau plus importante pour les substrats à bases de tuiles a été constatée, tant pour les éléments grossiers que pour la terre fine. On constate une évolution des propriétés des substrats au cours du temps. La rétention en eau des substrats neufs est beaucoup plus élevée. Les substrats évolués présentent une agrégation qui devra être plus finement analysée pour mieux en comprendre les propriétés. Ces évolutions sont liées à celle de la matière organique dont la teneur ne chute généralement pas avec le temps, mais dont la qualité évolue.

Table des matières

Résumé	1
1. Introduction.....	3
2. Matériel et Méthode	4
2.1 Caractérisation des substrats	4
2.1.1 Echantillonnage	4
2.1.2 Structure et propriétés analytiques	5
2.2 Bilan hydrologique de toiture.....	7
2.2.1 Toitures extensives.....	8
2.2.2 Toitures intensives	8
2.2.3 Bilan hydrologique.....	8
2.2.4 Évapotranspiration réelle (ETR).....	9
3. Résultats et discussion	9
3.1 Caractérisation des substrats	9
3.1.1 Analyses chimiques	9
3.1.2 Analyses physiques.....	11
3.1.3 Bilan hydrologique.....	19
3.1.4 Évapotranspiration réelle et potentielle	22
3.2 Diagnostic d'évolution des substrats	26
4. Conclusion et perspectives.....	27
5. Références	28
6. ANNEXES I : Analyses chimiques	30
7. ANNEXE II : Granulométrie.....	32
8. Annexe III : Cumul des débits	34

1. Introduction

Face à une urbanisation croissante des milieux urbains (évaluée à 83 % en 2030 (Antrop, 2004)), le développement durable, la protection de la biodiversité et qualité de vie sont des thématiques fortes dans les projets d'urbanisme et d'architecture. C'est notamment ce que la ville de Genève vise à encourager au travers de la mise en place de son programme *nature en ville*. Les toitures végétalisées font partie des mesures sollicitées. Genève compte aujourd'hui plus de 300 toitures végétalisées (Massy et al., 2011).

De nombreuses études ont mis en lumière les bénéfices des toitures végétalisées : réduction du volume de ruissellement, réduction de la pollution de l'air, rafraîchissement de l'air, augmentation de la biodiversité et amélioration visuelle et sonore du cadre de vie. La mise en place de toits verts permettrait notamment de renforcer le bilan thermique estival des bâtiments, induisant des économies d'énergie. Sachant que l'immobilier représente 47% des besoins totaux en énergie en Suisse (Saadatian et al., 2013), la mise en place de toits verts devient à ce seul titre une stratégie à considérer.

En créant des lieux où l'eau peut être temporairement stockée puis évaporée, les toitures végétalisées permettent la réduction des écoulements évitant une surcharge des réseaux d'eaux claires et participent à la régulation des débits de pointe (Berretta et al. 2014). Selon la littérature, les toitures végétalisées réduisent de 30 à 86 % le volume des eaux de ruissellement, limitent le débit de pointe de 22 à 93 % et le retardent de 0 à 30 minutes. Ceci dépend évidemment des différents paramètres de la toiture et de l'environnement: volume de précipitations, conditions antécédentes, nature et épaisseur du substrat, espèces de plantes et pente de la toiture (Li et al., 2014, Mentens et al., 2006). De par les nombreuses variables en jeu dans l'efficacité de la rétention d'eau, il est difficile de prédire la performance hydrologique d'une toiture. De nombreuses études mettent en avant l'épaisseur du substrat comme étant la caractéristique essentielle déterminant le comportement hydrique d'une toiture (FLL, 2008). Cependant, la composition de ce dernier pourrait avoir un effet plus significatif (Graceson et al., 2013). Deux aspects interviennent dans l'appréciation des propriétés hydriques du substrat : l'impact sur les écoulements (hydrologie), et la capacité de rétention d'eau utile à la végétation, soit la réserve en eau (agronomie). L'évapotranspiration est un facteur important affectant la vitalité et la performance des toitures végétalisées. Les différentes études montrent des valeurs de 1 à 3 mm par jour (sur toitures extensives) en fonction des conditions climatiques (Marasco et al., 2015). La réserve en eau assurée par un substrat est à confronter à ces valeurs et à la météorologie locale.

Bon nombre des fonctions d'une toiture végétalisée dépendent du substrat: régulation thermique, végétation, biodiversité accueillie, évapotranspiration, etc. Il remplit le rôle d'un sol artificiel permettant l'ancrage des racines tout en fournissant l'eau, les nutriments et un environnement favorables aux plantes. Il doit être léger, stable, aéré et capable de drainer l'eau aisément (Ampin et al., 2010). Les substrats de toitures sont souvent un mélange d'éléments naturels (argile, sable, lave) et artificiels (perlite, vermiculite), avec des matériaux recyclés (brique, tuile, béton) et de la matière organique (MO) (compost, tourbe). Les éléments grossiers forment un squelette autoporteur. Les éléments fins et la MO doivent jouer un rôle de rétention d'eau et de nutriments. Des guides de recommandations quant aux différentes caractéristiques de substrats à utiliser ont été formulés en Allemagne (FLL, 2005), en France (ADIVET, 2007) et en Suisse (ASVE 1999).

Les études sur les toitures végétalisées sont en majeure partie réalisées sur des prototypes conçus pour l'expérience. Le substrat est donc neuf. Or diverses caractéristiques sont susceptibles d'évoluer au cours du temps. Les matières organiques fraîches vont se dégrader et évoluer, une agrégation peut

se développer et la fraction grossière (< 2 mm, le squelette) est susceptible de se réorganiser. Tous ces changements peuvent affecter la fertilité et le comportement hydrique du substrat. Pourtant, très peu d'études, à notre connaissance, sont réalisées directement sur des toitures relativement anciennes (Speak et al., 2013, Marasco et al., 2015). Si l'on cherche à connaître l'impact environnemental des toitures végétalisées, et si les propriétés du substrat évoluent, cette lacune doit être comblée. Notre recherche se déroule donc sur des toitures végétalisées de différents âges.

Les objectifs de cette étude sont :

- Une caractérisation agronomique, hydrodynamique et physique comparée des substrats (neufs et anciens prélevés sur les toitures sélectionnées) ;
- Une discussion de ces observations en fonction de l'épaisseur et de l'ancienneté du substrat ;
- Une caractérisation de l'évolution des matériaux organiques avec le temps et mise en relation avec l'hydrologie, la fertilité, et les associations végétales et faunistiques hébergées ;
- Une analyse critique des protocoles de caractérisation physique des substrats proposés par les associations professionnelles.

2. Matériel et Méthode

2.1 Caractérisation des substrats

2.1.1 Echantillonnage

Toutes les toitures extensives (de plus et moins de 10 ans) sélectionnées pour l'étude ont été échantillonnées après vérification de l'homogénéité du substrat sur la toiture. Un échantillon moyen de 10 litres a été prélevé selon les recommandations ASVE (1999) et Guerin et al. (2014). Des échantillons non remaniés ont également été prélevés lorsque la texture du substrat le permettait.

Sur les toitures intensives sélectionnées par l'étude (plus et moins de 10 ans), après vérification de l'homogénéité, trois échantillons non remaniés ont été prélevés. Lorsque le substrat (trop grossier) ne le permettait pas, se sont 2 à 3 litres de substrat qui ont été échantillonnés.

Plusieurs échantillons de substrats neufs nous ont été fournis par diverses entreprises de verdissement de toitures :

- Ricoter : 193 (intensif ; pouzzolane)
- Ricoter : 132 (extensif, pouzzolane)
- ZinCo : Sedumtepish (extensif ; tuile)
- Weiss + appetito : W+A toits vert plus (extensif ; tuile)

L'historique des toitures végétalisées est très difficile à obtenir. Les informations sur la composition du substrat ainsi que sur l'entreprise ayant réalisé la toiture est peu, voire pas accessible. Néanmoins, dans cette étude, trois toitures sélectionnées ont trouvé leur correspondant en substrat neuf permettant une comparaison. Il s'agit de :

- HEAD / Weiss+apetito
- Pavillon de l'enfance/ ZinCo
- Espace Hippomène/ Ricoter extensif

2.1.2 Structure et propriétés analytiques

Les analyses chimiques et physiques ont été réalisées sur toutes les toitures sélectionnées dans le cadre de l'étude, soit 28 substrats (intensifs comme extensifs). Les 4 substrats neufs ont également fait l'objet d'analyses.

Analyses chimiques

Les analyses chimiques suivantes ont été réalisées sur la fraction fine (< 2 mm) de chaque substrat après tamisage. Les protocoles utilisés pour les trois premières analyses ci-dessous sont les méthodes fédérales prescrites par l'Agroscope.

- pH (H₂O 1 :2.5)
- Matière organique (MO) par oxydation
- Analyses de fertilité (P, K, Mg, Ca)
- Carbone organique par calcination
- Azote organique selon le protocole de Kjeldahl
- Capacité d'échange cationique (CEC) selon la méthode au chlorure de cobaltihexamine

Analyses physiques

Courbes granulométriques

Les courbes granulométriques des substrats ont été réalisées par tamisage afin d'obtenir la distribution de taille des particules. Pour se faire, les échantillons de substrat sont séchés à l'étuve (40°) durant 48 heures, puis tamisés dans une tour de tamis selon les 8 seuils de tamisage décrits dans les normes FLL (2008) : 0.04 ; 0.063 ; 0.125 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 4 et 6.3 mm. Par convention, dans ce qui suit, on appellera « terre fine » la fraction inférieure à 2 mm et « fraction grossière » la fraction supérieure à 2 mm.

Rétention en eau

Protocole ASVE et ADIVET – présentation et analyse critique

Les protocoles proposés par l'Association Suisse des spécialistes du Verdissement des Edifices (ASVE), ainsi que par l'Association des toitures Végétales (ADIVET, France) ne s'appliquent qu'aux substrats de toitures extensives.

Le protocole ASVE permet la mesure des volumes de la macroporosité (LK) et de la capacité utile de rétention d'eau (nFK). Les mesures se font par la différence de poids d'un échantillon sec à 105° (g3) et son état après mise en saturation par immersion de 15 minutes (LK) (g1) puis ressuyage de 2 à 4h (nFK), jusqu'à l'atteinte d'un poids constant (g2). Selon l'ASVE, la nFK doit être ≥ à 20 %, et la LK ≥ à 40 % du volume.

La macroporosité (LK) et la capacité utile de rétention d'eau (nFK) en % volumique sont calculées de la manière suivante :

$$nFK = \frac{g2-g3}{p} / VBA \cdot 100 \quad \text{eq.1}$$

$$LK = \frac{g1-g2}{p} / VBA \cdot 100 \quad \text{eq.2}$$

Avec p: densité de l'eau (1g/cm³) et VBA le volume du système en cm³.

L'ASVE distingue la capacité utile de rétention d'eau (nFK) de l'eau totale disponible pour les végétaux (rWK, % volume) qu'elle calcule de la manière suivante :

$$rWK = LK + nFK \quad \text{eq.3}$$

Les normes de rWK se définissent en fonction de la moyenne des précipitations, qui dans le canton de Genève varient entre 800 et 1000 mm par année. Dans ce cas, l'ASVE préconise une rWK ≥ 60 % (vol.).

Le terme de capacité utile de rétention en eau utilisé ici par le protocole ASVE diffère de la définition agronomique, normalement définie comme étant la quantité d'eau restituable aux végétaux après la phase de drainage gravitaire. Selon le protocole ASVE cette définition se réfère donc à la rWK et non pas à la nFK. La définition de rWK comme eau utile pour les végétaux est étonnante puisque la part (LK) va effectivement s'écouler rapidement. Elle donne des résultats contradictoires avec les concepts agronomiques, puisque l'eau disponible rWK sera supérieure à l'eau retenue nFK. Enfin, la valeur g_3 - sec à 105°C détermine le point sec, limite inférieure selon ASVE de l'eau utile aux plantes (rWK) ce qui n'est pas non plus réaliste. Cette température correspond à des potentiels de milliers de bars de succion, les plantes n'exploitant que 15 bars au maximum. L'ASVE a peut-être supposé que l'écart entre la valeur de teneur en eau à 15 bars et celle à 105°C était négligeable dans ce type de matériau, ce qui reste à démontrer.

Le protocole ASVE permet également une mesure de la porosité du substrat (P) selon la formule suivante :

$$P = (g_1 - g_3) / VBA \cdot 100 \quad \text{eq.4}$$

Le protocole ADIVET propose, au même titre que le protocole ASVE, une mesure de la quantité d'eau retenue par les matériaux constitutifs (capacité maximal en eau – CME) exprimée en % du volume, avec un temps de saturation par immersion de 24h et d'un temps de ressuyage de 2h.

Le protocole ADIVET se dit « applicable au complexe complet de végétalisation ou isolement à chacun des matériaux constitutifs ». Ainsi, ce protocole a été choisi pour mesurer la capacité maximale de rétention en eau des éléments grossiers uniquement, tandis que le protocole de l'ASVE a été choisi pour l'ensemble du substrat, car le mieux détaillé.

Le protocole ASVE recommande un échantillon de 10 litres pour la réalisation des mesures. Ce qui n'est pas le cas du protocole ADIVET qui ne préconise aucun volume défini pour l'expérimentation. Selon Guerin et al. (2014), le volume d'échantillon, pour être représentatif, doit être défini selon la taille maximale des éléments grossiers (Tableau 1). Dans cette étude, la taille des éléments grossiers varient entre 2 et 3 cm. Se sont donc 10 litres de substrat qui ont été prélevés pour la réalisation des mesures de rétention en eau selon le protocole ASVE (Figure 1). Pour cette même raison il n'a pas été possible de réaliser aucun réplicas.

Tableau 1 Quantité minimale de matière à prélever selon la taille des composants.

Taille maximale des composants	Quantité minimale de matière à prélever	
10 cm	100 kg	} Prélèvement dans le terrain
5 cm	30 kg	
2 cm	5 kg	
1 cm	1.5 kg	
2.5 mm	100 g	} Traitement des échantillons en laboratoire
1.5 mm	20 g	
1 mm	5 g	
< 0.1 mm	1 g	



Figure 1. Cylindre utilisés pour la réalisation du protocole ASVE

Enfin, les protocoles ASVE et ADIVET proposent des outils de mesure de rétention en eau sur des échantillons de substrat remaniés. Cependant, le remaniement modifie certaines caractéristiques du substrat comme l'agrégation et l'empilement de la fraction grossière, influençant de ce fait la porosité et la rétention en eau. Nous avons donc voulu également réaliser des analyses sur échantillon non remanié via la méthode des courbes de désorption.

Courbes de désorption

Cette méthode permet la mise en relation du potentiel matriciel (h) avec la teneur en eau de l'échantillon (W). La mesure est faite en continu (de 0 à 1 bar) sur des volumes de 150 cm³ environ. La prise de mesure se fait toutes les 5 minutes. Tous les échantillons sont saturés à un potentiel de -10 mbar avant le début de la mesure et cette dernière est effectuée jusqu'à poids constant (Figure 2A).

Les courbes de désorption ont été réalisées sur 1) échantillons non remaniés, 2) échantillons remaniés, 3) terre fine (<2mm) et 4) éléments grossiers (>2mm) de substrats intensifs comme extensifs.

Une méthode de mesure originale a dû être développée afin de mesurer la rétention en eau des éléments grossiers. Pour ce faire, ces derniers sont inclus dans un lit de microbilles pré calibrées (Figure 2B). La courbe de désorption ainsi obtenue est soustraite à la courbe de désorption des microbilles. Cette dernière a un aspect typique, la désorption se déroulant à un potentiel précis, correspondant au rayon des pores entre les billes (selon la relation : $\text{rayon pores } (\mu\text{m}) = 0.15 \cdot 10^4 \div h \text{ (mbars)}$). On obtient ainsi, la courbe de désorption des éléments grossiers seuls. Cette méthode a été réalisée sur des éléments grossiers utilisés le plus couramment sur les toits, à savoir la tuile et la pouzzolane (3 répétitions).

A partir des données de rétention en eau de la terre fine et des éléments grossiers, une reconstitution des courbes du substrat complet a été entreprise en additionnant les courbes terre fine + grossiers. Dans ce qui suit, ces courbes seront appelées courbes reconstituées (rec.).

Le calcul de la porosité totale (% vol.) est mesuré sur les courbes d'échantillons non remanié et reconstitué, multiplié par la densité apparente des échantillons (mesurée au laboratoire-méthode de la poche plastique). La porosité est définie comme la teneur en eau à saturation (cm³), soit à un potentiel de -10 mbars.

2.2 Bilan

hydrologique de toiture



Figure 2. A : Courbe de désorption : matériel de mesure, B : désorption des éléments grossiers (> 2 mm) inclus dans un lit de microbilles.

Sur 10 toitures pré sélectionnées, seules 6 ont pu être étudiées en raison des contraintes d'équipement. Il s'agit de :

2.2.1 Toitures extensives:

- Bâtiment de la HEAD
- EMS de la Rive
- EMS des Marronniers
- Ecole de l'Europe
- HUG

2.2.2 Toitures intensives

- Collège de la Seymaz

Quatre autres toitures avaient été sélectionnées pour un suivi hydrologique. Il s'agissait de l'école des Petites Fontaines dont le réseau d'évacuation des eaux de toitures se trouve raccordé à un autre réseau inconnu ne permettant pas la mesure des débits de la toiture. La piscine d'Onex, la toiture des HUG extensive ainsi que l'école du Petit Senn avaient également été sélectionnées. Ces dernières présentent des problèmes de mise en place du matériel de mesure de débit (évacuations trop peu accessibles).

Les éléments grossiers composant le substrat des 5 toitures étudiées diffèrent : la toiture de la HEAD ainsi que l'EMS de la RIVE sont composés d'un seul type d'éléments grossiers, à savoir la tuile. La toiture de l'EMS des Marronniers est principalement composé de pouzzolane. Quant aux substrats de toitures de l'Europe et des HUG, ils sont composés d'un mélange de plusieurs types d'éléments grossiers (principalement pouzzolane et argile concacée).

2.2.3 Bilan hydrologique

De par la grande difficulté d'accéder aux évacuations des eaux de toitures des bâtiments, les mesures de débit sont déterminées via la mise en place de déversoirs en V (rectangulaires ou cylindriques, Figure 3) développés pour ce travail et directement placés dans les évacuations de la toiture. Les débits sont ensuite mesurés à partir de la hauteur d'eau dans le déversoir par une sonde pression (Hobo water level logger U20-001-04, Onset). Les données sont prises toutes les 5 minutes. Un système de mesure équivalent au système cylindrique développé est décrit dans la littérature (Speak *et al.*, 2013).



Figure 3. Déversoir cylindrique pour mesure de débit sur toiture

Pour des questions pratiques et de sécurité, la mesure de débit ne se fait que sur une seule des bouches d'évacuation d'eau de la toiture. Le débit mesuré est donc partiel (Q_{par}). Le débit total (Q_{tot}) est ensuite calculé en prenant en considération la surface du bassin versant drainé. Pour cela, on utilise de longues périodes où pluies et débits sont stabilisés avec substrat saturé (données watermark®, voir ci-dessous). Les débits de sortie sont alors équivalents à ceux des précipitations sur l'ensemble de la toiture. Ainsi, durant ces périodes, le rapport pluie totale/débit mesuré nous permet d'obtenir la fraction de pluie récupérée par la bouche ce qui nous donne le facteur multiplicateur pour le calcul du débit total de la toiture.

Le C.O de la Seymaz était déjà équipé d'un système de mesure mis en place par le département de l'environnement, des transports et de l'agriculture (DETA) (REF). Ces données ne seront pas traitées ici (Cf Analyse de l'efficacité hydrologique d'une toiture végétalisée, Consuegra et al., (2016)).

En plus des mesures de débits, il avait été prévu d'installer des pluviomètres sur les toitures étudiées. Ceci n'a pas pu être réalisé pour des questions pratiques et financières (accès difficile à l'électricité et manque de matériel). Seule la toiture de la HEAD fut équipée d'une station météo complète nous permettant d'avoir des données de pluviométrie. Ces données ont été utilisées pour les toitures suivantes : école de l'Europe, HUG et HEAD. Ce sont les données de Météo Suisse qui ont été utilisées pour l'EMS des Marronniers (Station Jussy) et d'Agrométéo pour l'EMS de la Rive (Station Bernex).

L'état hydrique du substrat (potentiel matriciel (h) de 0 à 200Cbars) est également mesuré toutes les heures par 3 sondes watermark® positionnées (si la hauteur de substrat est suffisante) à différentes profondeurs.

2.2.4 Évapotranspiration réelle (ETR)

Le suivi hydrologique de toiture nous permet également la détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR). Pour ce faire, nous utilisons les périodes sans précipitation ni écoulement, les mesures de sonde Watermark® (potentiel matriciel -h- du substrat) et leur conversion en teneur en eau (W) via l'établissement de la courbe de désorption au laboratoire. Les données d'ETR seront confrontées aux mesures d'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée par la formule de Penmann –Monteith (FAO : Smith et al., 1992) calée avec les données mesurées par l'équipe thermique et celle de Météo Suisse, dans les cas où les substrats sont suffisamment humides (moins de 1 bars de succion). Rappelons que l'ETP calculée selon l'équation de Penmann-Monteith FAO ne prend pas en considération l'état hydrique du sol et est une mesure de référence pour un couvert végétal de type gazon.

3. Résultats et discussion

3.1 Caractérisation des substrats

3.1.1 Analyses chimiques

Le tableau des résultats des analyses chimiques des 28 toitures (extensives et intensives) ainsi que des substrats neufs est présenté en Annexe I. Ces résultats sont présentés en références pondérale à la terre fine et non au pourcentage total sur la toiture.

Ces résultats nous montrent des valeurs de pH en moyenne neutres (7.1), variant pour les toitures extensives de 5.9 pour la piscine d'Onex à 7.9 sur la toiture de l'espace Hippomène. Les pH sur toitures intensives varient dans une gamme moins large, de 6.2 pour les HUG à 7.5 pour l'école du Petit Senn. Les moyennes de pH entre toitures extensives et intensives sont identiques à savoir 7.1. Les moyennes de pH ne diffèrent pas entre les substrats neufs (7.3) et les plus anciens (7.1). Aucune différence n'est à relever entre substrat tuile et pouzzolane. Les gammes de pH recommandées par la FLL pour les toitures extensives se trouvent entre 6.5 et 8 et entre 5.5 et 8 pour les toitures intensives. Généralement, se sont dans ces valeurs que les nutriments sont disponibles pour les plantes (pH de 5.5-7 (Ampin et al., 2010)). Les toitures étudiées dans le cadre de cette étude se trouvent donc en moyenne dans les gammes recommandées.

Le taux de matière organique oscille entre 0.7 et 12.7 %. La moyenne sur les toitures extensives est de 4.7 % avec un minimum de 0.7 % mesuré sur la toiture MQ Huttins et un maximum à 10.4 % sur les HUG. La moyenne des toitures extensives est sensiblement plus élevée avec un taux de 6.3 %. Le maximum de 12.7 % et le minimum de 2.7 % sont respectivement mesurés sur les toitures de l'école du Petit Senn et la toiture des HUG. Le taux de MO recommandé par la FLL est de 6-8% pour les toitures

extensives et de 6-12% pour les toitures intensives. Les valeurs trouvées sur les toitures de l'étude sont légèrement en dessous des normes préconisées.

De ce point de vue, les substrats extensifs, diffèrent fortement des sols naturels (non cultivés), pour lesquels la teneur en matière organique est assez bien corrélée à la teneur en argile. De toute évidence, la matière organique n'est pas organisée ici en association organo-minérale, similaire à celle des sols, sinon les teneurs seraient beaucoup plus faibles.

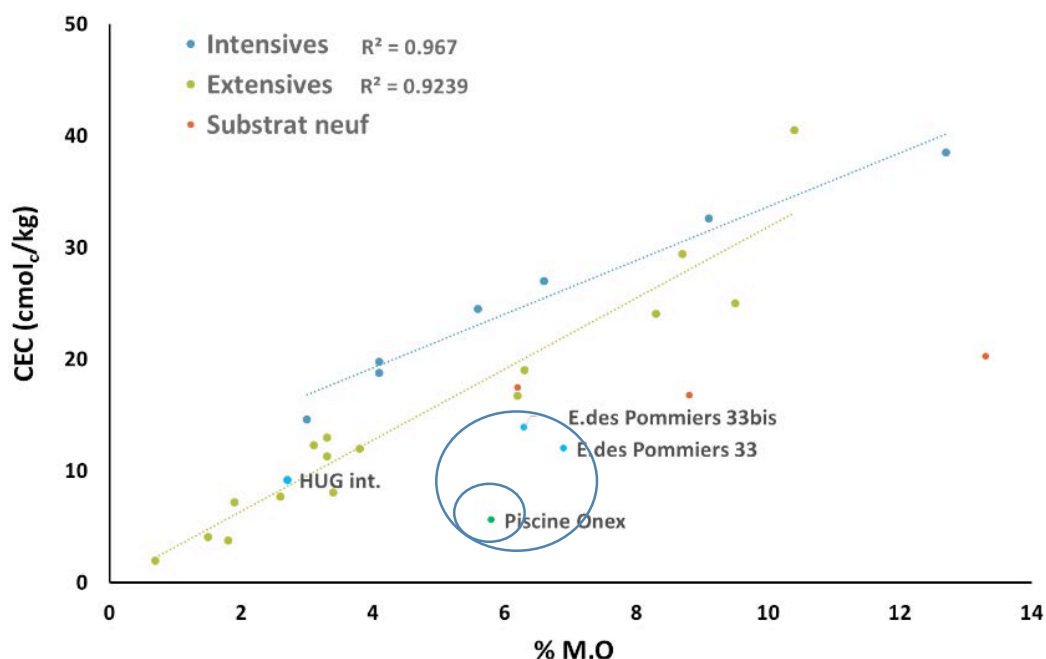


Figure 4. Corrélation entre la matière organique (MO) et la capacité d'échange cationique (CEC) sur toitures intensives (bleu), extensives (vert) et substrat neuf (orange).

La principale source de capacité d'échange cationique (CEC) dans les substrats de toitures est la matière organique (Figure 4). La CEC est expliquée à 92 % par la matière organique pour les toitures intensives (R^2 : 0.9239) et à 96 % pour les toitures extensives (R^2 : 0.967). Les toitures intensives à fraction minérale grossière (Pommiers 33/33bis et HUG urgence pédiatrique) se trouvent bien en dehors de la régression linéaire. Ces toitures ont certainement une matière organique non humifiée et pas/peu d'activité biologique. Nous ne trouvons aucun effet du pH sur la CEC, probablement dû aux constituants minéraux qui ne sont pas réactifs.

Aucun réplica n'a été réalisé sur les analyses chimiques. De ce fait, les résultats présentés ne reflètent pas une moyenne sur la toiture, bien que l'homogénéité ait été contrôlée avant échantillonnage. Néanmoins, on ne note pas d'augmentation ni de diminution effective de la teneur en matière organique sur les toitures de la HEAD ni sur celle du Pavillon de l'Enfance par rapport au substrat d'origine (Tableau 2). Seule la toiture de l'espace Hippomène présente une nette diminution du taux de MO, du carbone organique et de la CEC par rapport au substrat d'origine (s'il correspond bien au Ricoter extensif 132). Notons que cette toiture n'a pas de pente (0 %). Le substrat en place se sature très rapidement créant un milieu très peu oxygéné et hydromorphe.

Tableau 2. Comparaison entre substrats neufs et substrats toitures, propriétés chimiques

Toitures/ Analyses	1		2		3	
	HEAD	Weiss+	Pav.Enfance	ZinCo	Hippomène	Ricoter ext.
pH	7.9	7.6	7.2	7.1	7.9	7.2
M.O	9.5	8.8	6.3	6.2	2.6	13.4
C org %	6	5.8	4.6	4.5	2.3	7.5
CEC	25	16.8	19	17.5	7.7	20.3

Nous pouvons voir au travers de ces différentes analyses, que les toitures extensives se situent globalement dans les normes en termes de propriétés chimiques. Il est intéressant de voir que la CEC est à plus de 90% expliquée par la matière organique sur les toitures intensives et extensives, indépendamment de l'âge de toitures, ce qui n'est de loin pas le cas des substrats neufs, car la matière organique n'est, à ce stade, pas humifiée. La comparaison entre substrat neuf et ancien est délicate. Dans leur étude, Getter et al. (2007) ont comparés le taux de matière organique d'un substrat neuf extensif au même substrat après 5 ans sur un toit végétalisé. Les résultats montrent un taux de matière organique ayant doublé, passant de 2.33 à 4.25 %. Ceci n'est pas le cas dans cette étude. Il serait intéressant de renouveler l'expérience avec un échantillon de substrat neuf, récolté directement lors de sa mise en place sur la toiture. Il est en effet probable que la composition du substrat varie entre la sortie de l'usine et sa mise en place.

Les observations réalisées montrent que (i) les teneurs en matière organique restent élevées, (ii) mais la forme organique et donc la CEC ont changé et (iii) certaines toitures peuvent perdre beaucoup de MO.

3.1.2 Analyses physiques

Granulométrie

En Annexe II se trouve le tableau récapitulatif de granulométrie par tamisage pour toitures extensives et intensives ainsi que des substrats neufs.

Nous notons une différence bien marquée entre toitures extensives et intensives (Figure 5). Les toitures extensives se démarquent par une bien plus grande concentration d'éléments grossiers, avec une moyenne de 80 % versus 37 % sur les toitures intensives. Le pourcentage total en éléments grossiers est plus élevé pour les substrats tuile avec une moyenne à 90 % que les substrats à base de pouzzolane qui trouvent leur moyenne à 76 %.

Pour les toitures extensives, les normes FLL préconisent 1) une proportion d'éléments inférieurs à 63 μ m ne devant pas dépasser 15 % et 2) une proportion d'éléments supérieurs à 4 mm inférieure à 50%. Dans notre cas, la première condition est bien respectée sur l'ensemble des toitures extensives avec une proportion d'éléments < à 63 μ m en moyenne de 0.8 %. La deuxième recommandation est, elle, beaucoup moins respectée. Sur les 20 substrats de toitures extensives (dont 3 neufs), 1 seul substrat répond aux normes proposées avec une proportion d'éléments < 4 mm de 47.4 %. Cette toiture est celle de l'Europe. Tous les autres substrats ont des valeurs > 50 % avec un maximum de 87.15 % mesuré sur la toiture de l'EMS de la Rive. Aucune des deux exigences ne sont remplies chez les substrats neufs étudiés ici. Notons le cas particulier de la toiture des HUG qui se démarque des autres toitures extensives avec un pourcentage d'éléments grossiers de 28.7 % et 71.3 % de terre fine. Le nom respect de cette exigence devrait se manifester sur la porosité grossière, plus élevée.

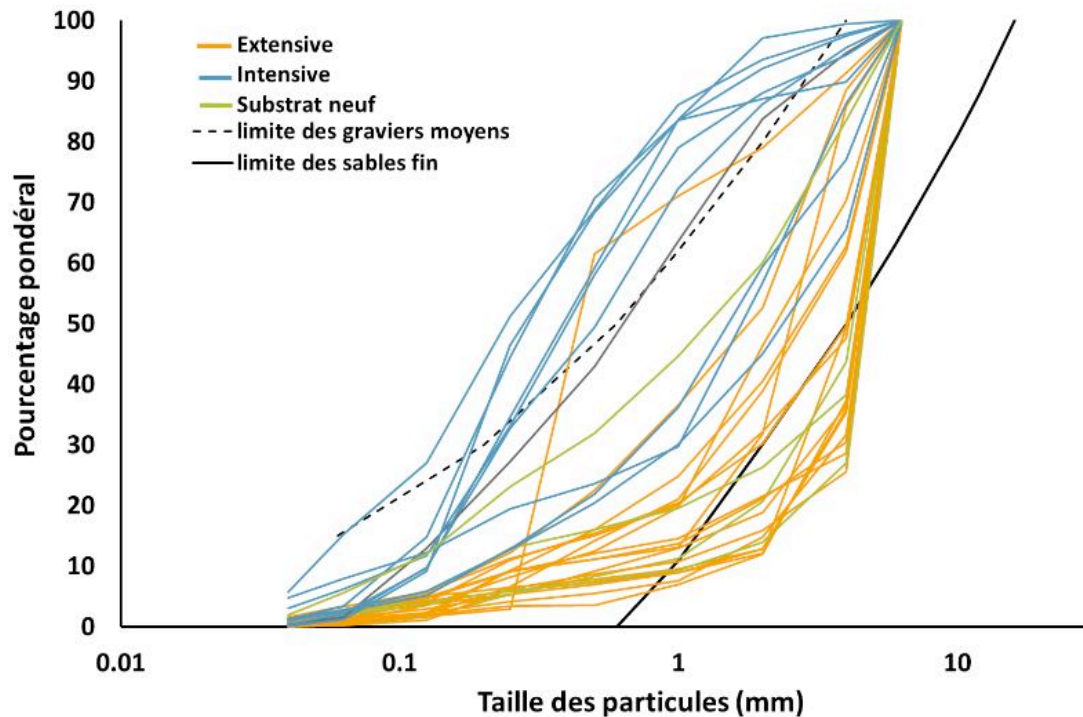


Figure 5. Courbes granulométriques selon la taille des particules (mm) et le pourcentage cumulé. En orange les toitures extensives, en bleu les intensives. En tirets, la limite des sable fin et en noir, celle des graviers moyens selon les normes FLL (2008).

Propriétés hydriques

Porosité du substrat

La porosité mesurée sur l'ensemble du substrat via le protocole ASVE sur les toitures extensives est présentée dans la Figure 6. La mesure ASVE est comparée, lorsque possible, aux mesures de porosité faites via les courbes de désorption (substrat non remanié-vert- ou reconstitué-orange-).

La moyenne de porosité selon l'ASVE est de 43% (v/v) avec un minimum de 33% et un maximum à 55 % pour respectivement la toiture de la HEAD et les HUG. On ne décèle pas de différences de porosité entre les substrats à base de tuile ou de pouzzolane. De larges écarts sont même à relever entre les porosités d'un même type de substrat. Prenons l'exemple des mesures sur les substrats tuile de la HEAD et de l'EMS de la Rive avec des porosités variant de 53.12 % (v/v) pour Rive versus 32.62 % (v/v) pour la HEAD.

Ces différences ne sont pas autant marquées selon les mesures sur les courbes de désorptions. Les substrats tuile ont une porosité similaire variant de 28 à 32 % (v/v). Dans l'ensemble, on observe une forte surestimation de la porosité par le protocole ASVE.

La différence entre les deux mesures provient certainement d'un remaniement du substrat qui introduit une porosité supplémentaire.

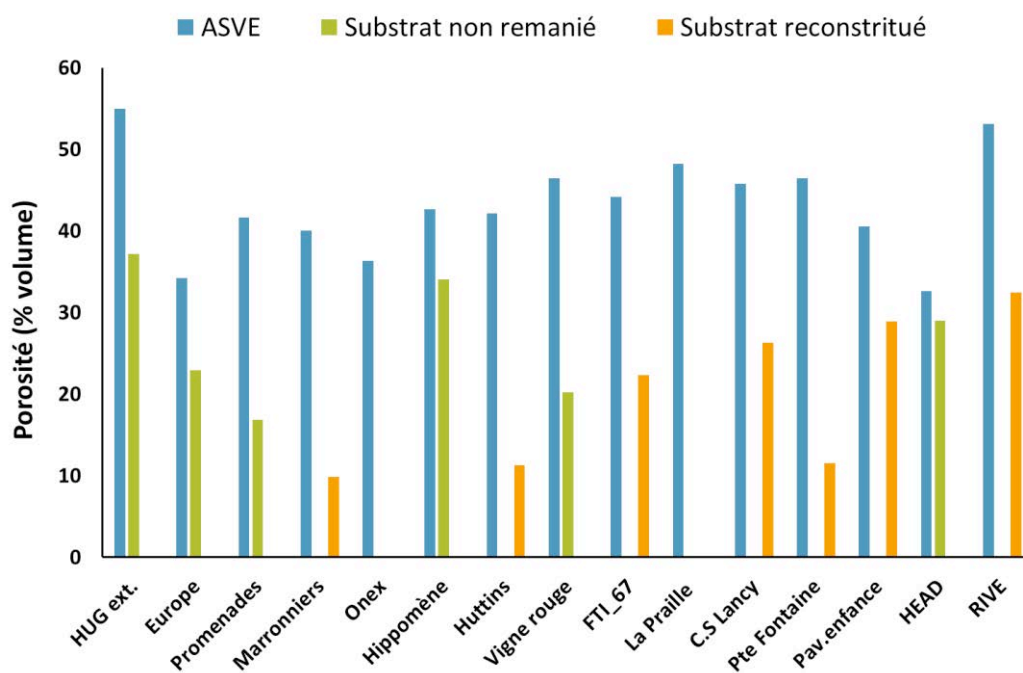


Figure 6. Porosité des substrats de toitures extensives selon le protocole ASVE et les courbes de désorptions réalisées sur des échantillons de substrats non remaniés (vert) ainsi que reconstitués (orange : terre fine + grossiers)

Rétention du substrat complet

Les capacités de rétention en eau de substrats de toitures extensives ont été mesurées au travers du protocole proposé par l'ASVE. Les résultats sont présentés en Figure 7.

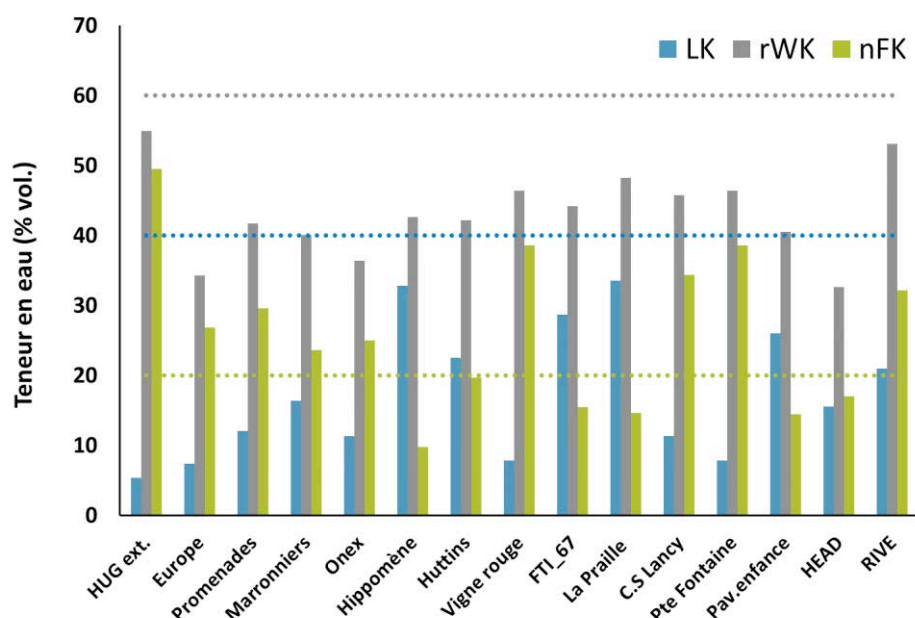


Figure 7. Rétention en eau du substrat de toitures extensives selon la méthode proposée par l'ASVE (% volumique). En bleu clair, la macroporosité (LK), en gris, le volume d'eau disponible pour les végétaux (rWK) et en vert, la capacité utile de rétention en eau (nFK). Les lignes pointillées de même couleur indiquent les exigences imposées par l'ASVE

Les exigences en matière de nFK doivent être $\geq$ à 20 % (vol.). Dans notre cas, 9 toitures sur 15 répondent à ces exigences avec une moyenne totale de nFK de 30 %. Le maximum est mesuré à 49.6%

sur la toiture des HUG (fort taux de terre fine). Les toitures ne rentrant pas dans les normes nFK sont: FTI_67 et la Praille (toitures de > 10 ans) ainsi que l'espace Hippomène, le Pavillon de l'Enfance et la toiture de la HEAD. Ces dernières sont pourtant récentes (moins de 10 ans).

En ce qui concerne les exigences de macroporosité (LK), aucun des substrats de toitures ne rentre dans les normes imposées à 40 % (vol.). La moyenne se trouve bien en dessous des exigences avec 17.3 % de LK. Les maxima et minima sont respectivement mesurés sur la toiture de la Praille avec 33.5 % et sur celle des HUG avec 5.4 %. Ces résultats sont étonnants étant donné le fort pourcentage d'éléments grossiers mesuré au travers des analyses granulométriques induisant normalement une forte macroporosité, particulièrement après remaniement.

Enfin, le seuil de 60 % d'eau disponible pour les plantes (rWK) n'est non plus pas atteint sur aucune toiture (Figure 7). Rappelons que la rWK se calcule par l'addition de la nFK et de la LK, raison pour laquelle ces valeurs sont supérieures à la capacité utile de rétention en eau.

Deux répétitions des mesures ont été faites pour 7 des 15 substrats. Les variations entre les mesures ne dépassent pas les 5 % en moyenne hormis pour la toiture de l'école des Petites Fontaines où les différences entre les deux mesures sont très élevées, allant jusqu'à 80 %. Ce substrat présentait un fort engorgement durant l'expérience (comme sur la toiture), l'eau drainait très mal. Ceci est étonnant car le substrat n'a pas un pourcentage de terre fine (13 %) ou de matière organique (3.3 %) très important, pouvant parfois être la cause d'un mauvais drainage.

Les courbes de désorption sur substrat non remanié permettent elles aussi une mesure de rétention en eau du substrat complet, mais basées sur des mesures continues de potentiel matriciel (suction) et non un temps de ressuyage arbitraire. Le Tableau 3 compare ces mesures de rétention à celles mesurées via le protocole ASVE (% vol.). Les résultats divergent de 20 à 70 % entre les deux méthodes et aucune tendance n'est à relever. Les valeurs ASVE surestiment autant qu'elles sous-estiment les valeurs en comparaison avec la désorption. Les valeurs maximales de teneur en eau sont trouvées sur la même toiture pour les deux méthodes, à savoir les HUG (très forte teneur en terre fine) et les teneurs en eau de la toiture de l'EMS de la Rive sont équivalentes. La plus grosse différence de mesure est faite sur l'espace Cube Hippomène avec une valeur ASVE de plus de 3x inférieure à celle mesurée par désorption.

De nombreuses différences sont à relever entre le protocole ASVE et la mesure de désorption sur substrat non remanié. Les mesures ASVE sont faites à partir de substrat remanié ce qui n'est pas le cas des courbes de désorption. Le remaniement du substrat peut entraîner des modifications quant à l'organisation des particules entre elles, détruire des agrégats et changer la porosité totale du substrat donc sa rétention en eau. Les deux méthodes divergent aussi par le protocole de saturation de l'échantillon. Dans le cas ASVE, le substrat est saturé par immersion durant 15 minutes, dans l'autre, la saturation se fait plus progressivement, durant plusieurs jours, par capillarité sur un bac à suction, mais pas jusqu'à un potentiel nul (immersion). Le niveau de saturation n'est donc pas le même ce qui peut expliquer la moyenne ASVE légèrement supérieure. Cependant la saturation lente permet de remplir les pores fins en dissolvant l'air des parties non ouvertes. À l'inverse, l'immersion permet de remplir les pores les plus grossiers (ASVE), mais ces derniers sont censés drainer très rapidement ensuite. Le protocole ASVE est conçu pour être effectué sur des substrats neufs (gros volumes et échantillon remaniés).

Tableau 3. Capacité utile de rétention en eau des substrats selon (ASVE v/v) et teneur en eau des substrats non remanié à un potentiel de -10mbars (désorption v/v). En rouge, les données des courbes reconstituées.

Toitures	ASVE (v/v)	Désorption (v/v)
HUG ext.	0.50	0.37
Promenades	0.30	0.17
Marronniers	0.24	0.10
Hippomène	0.10	0.34
MQ Huttins	0.20	0.11
Vigne Rouge	0.39	0.20
FTI_67	0.16	0.22
C.S Lancy	0.34	0.26
Pte Fontaine	0.39	0.12
Pav. Enfance	0.15	0.28
HEAD	0.17	0.29
Rive	0.32	0.32
Moyenne	0.27	0.23
Ecart type	0.12	0.09

La corrélation entre les rétentions en eau selon ASVE et celles selon notre mesure de laboratoire sur substrat non remanié est nulle. Les valeurs ASVE, bien que mesurées sur un volume beaucoup plus grand, sont plus variables (plus grand écart type).

Rétention des éléments grossiers

La rétention en eau des éléments grossiers (% vol.) selon le protocole ADIVET (Figure 8) est en moyenne de 30 % (v/v), tout type de substrats confondus. Ce protocole permet de mettre en évidence la capacité de rétention en eau non négligeable des éléments grossiers. La moyenne de rétention des éléments de type tuile est de 35 %, et de 29 % pour la pouzzolane. Selon ces premiers résultats, les tuiles retiennent en moyenne plus d'eau que la pouzzolane. Quatre substrats ont une des valeurs de rétentions inférieures à 25% : l'espace Cube Hippomène, Vigne-Rouge, MQ Huttins et l'école des

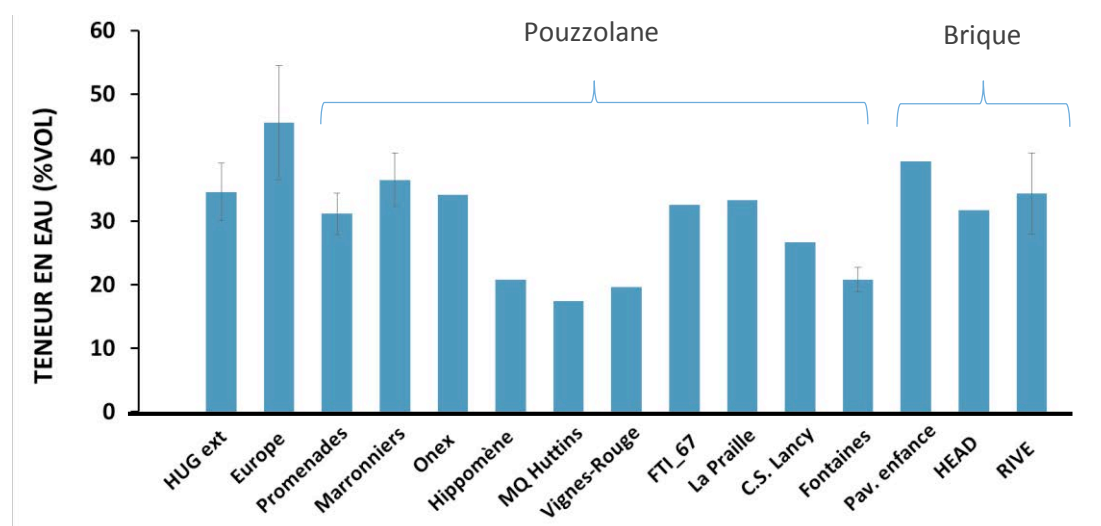


Figure 8. Rétention en eau des éléments grossiers en pourcentage volumique des toitures sur toitures extensives, mesure selon protocole ADIVET.

Petites Fontaines. Les mesures ont été répétées deux fois pour 6 des 15 toitures étudiées ici. Les écarts-types sont présents sur le graphique en Figure 8.

La mesure de la rétention en eau des éléments grossiers a également été faite grâce aux courbes de désorption (Figure 9). Les mesures ont été répétées trois fois sur chacun des matériaux (mais pas sur le même échantillon). Ces courbes ont été obtenues en soustrayant la courbe de désorption des microbilles seules à celle des microbilles + éléments grossiers. La reproductibilité des mesures est bonne sur les tuiles. C'est moins le cas pour les mesures sur la pouzzolane. La variabilité de mesure provient certainement de la plus grande hétérogénéité du substrat de manière générale (il n'est jamais composé uniquement de pouzzolane contrairement au substrat tuile). La courbe de désorption des éléments grossiers utilisée dans ce travail est la courbe représentée en pointillé noir.

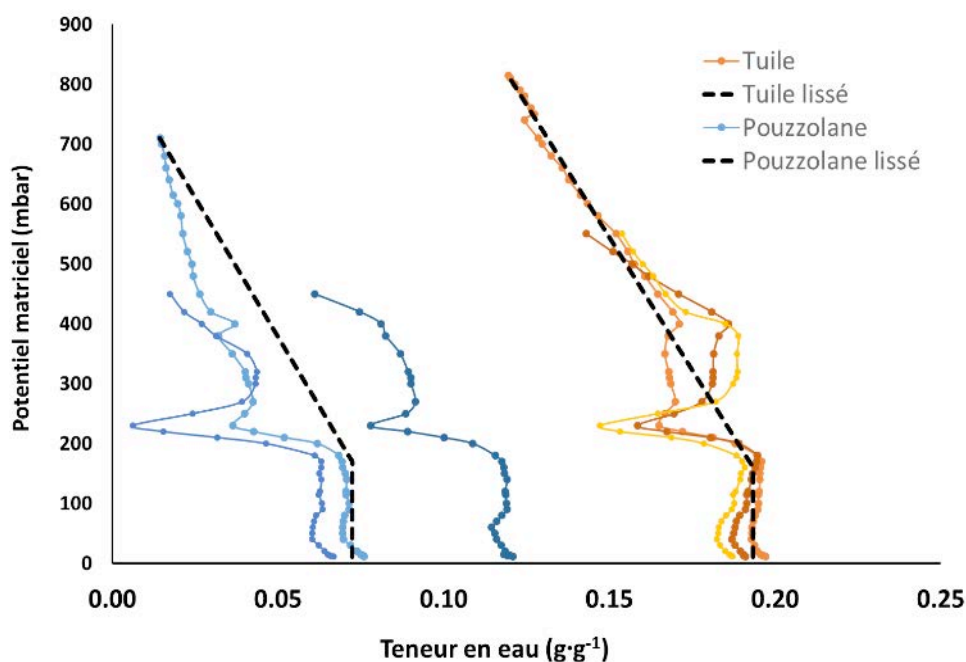


Figure 9. Courbes de désorptions sur éléments grossiers

Trois observations intéressantes ressortent de ces mesures. Premièrement les tuiles retiennent un pourcentage d'eau plus élevé que la pouzzolane, plus de trois fois plus à saturation. Deuxièmement, cette eau est relâchée régulièrement sur la gamme de potentiel mesurée (0-700 mbar), ce qui signifie que des pores fins (150 à 2 micromètres de rayon) sont en jeu. Troisièmement, la tuile dispose encore de 13% d'eau (m/m) à -700 mbar. Cette quantité est encore très élevée. Une toiture comportant 70% de tuiles concassées (en masse) disposera encore de $7 \times 0.13 = 9\%$ d'eau disponible pour les plantes à ce potentiel.

Les densités apparentes (masse sèche sur volume) des éléments grossiers ont été mesurées et sont de 2.40 et 2.19 respectivement pour la tuile et la pouzzolane. Ces valeurs nous permettent une conversion en pourcentage du volume des teneurs en eau en pourcentage de la masse. Suite à ce calcul les mesures ADIVET peuvent être comparées aux mesures de laboratoire.

Selon le protocole ADIVET, le pourcentage de rétention en eau de la tuile est de 35 % (v/v) comparé à 45 % (v/v) en mesure directe. La différence est d'autant plus grande pour la pouzzolane où la teneur en eau est mesurée à 29% (v/v) pour ADIVET versus 15 % (v/v). La valeur ADIVET paraît sur-estimée dans le cas de la pouzzolane et sous-estimée dans le cas de la tuile par rapport à la mesure directe. Une telle différence entre les deux méthodes est étonnante, sachant que les conditions de saturation

sont les mêmes, à savoir 24h en immersion. La mesure de rétention ADIVET est faite après 2 heures de ressuyage. La différence entre les deux méthodes peut provenir de l'eau de surface contenue sur les éléments grossiers. Dans un cas, elle serait comptée comme de l'eau contenue dans les microbilles, dans l'autre comme de l'eau utile.

Rétention en eau de la terre fine

En Figure 10 sont présentées les courbes de désorption mesurées sur la terre fine des toitures extensives. Toutes sont dans des gammes similaires. On décèle néanmoins une différence entre les courbes réalisées sur les substrats à base de tuiles (orange/jaune) et celles à base de pouzzolane (bleu). Les courbes sur substrat tuile retiennent plus d'eau que les autres, en moyenne $0.81 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ pour la tuile et $0.54 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ pour la pouzzolane (à un potentiel de -10 mbars). On peut supposer que les particules de tuile inférieures à 2 mm intégrées à la terre fine augmentent la rétention en eau de la terre fine.

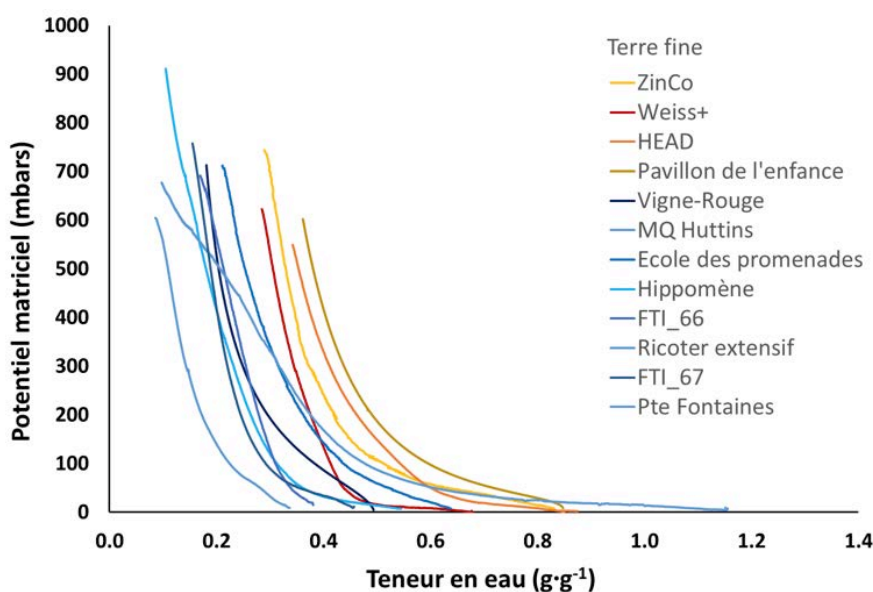


Figure 10. Courbes de désorption de la terre fine des toitures extensives

La composition en éléments grossiers d'un substrat de toiture n'est donc pas sans effet sur la rétention en eau de la terre fine. La terre fine des substrats à base de tuile retient presque deux fois plus d'eau à potentiel égal que celle des substrats pouzzolane, respectivement $0.81 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ et $0.54 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$.

Disposant des courbes de désorption de terre fine et des éléments grossiers, il devient intéressant de reconstituer les courbes de désorption de substrat complet à partir de l'addition des courbes de terre fine et celles des éléments grossiers en tenant compte de leurs proportions respectives (Figure 11). En Figure 11A, la reconstitution est globalement satisfaisante pour les substrats à base de pouzzolane. Les courbes reconstituées de l'espace Hippomène, de l'école des Promenades et de l'école de la Vigne-Rouge sont similaires à celles réalisées sur le substrat complet. Celles du substrat Ricoter (neuf) sont plus éloignées. Il s'agit ici d'un substrat riche en matière organique grossière (13.3%) qui n'a pas été prise en compte ni dans les mesures de terre fine (matériaux $>2 \text{ mm}$) ni celle des grossiers (car pas de la pouzzolane). Cette MO retient de l'eau, ce qui peut expliquer que l'addition de la terre fine et des grossiers (minéraux) ne rende pas compte du substrat complet.

Concernant la reconstitution des substrats à base de tuile (Figure 11B), les résultats sont également concluants. On note néanmoins ici plus clairement une tendance à la surestimation des teneurs en eau par les courbes reconstituées comparativement aux mêmes substrats non remaniés. Les courbes sur substrat neuf (ZinCo) sont très proches. Ce substrat contient peu d'éléments organiques grossiers en comparaison de Ricoter.

La Figure 12, compare les substrats neufs à leurs homologues plus anciens. On observe que les substrats de toitures « anciennes » ont tendance à retenir moins d'eau qu'un substrat neuf. Ceci peut être dû à une évolution du substrat en teneur de matière organique. La matière organique fraîche des substrats neufs est susceptible de retenir plus d'eau.

Ces comparaisons sont effectuées sur des petits volumes. Elles pourraient facilement être réalisées sur des volumes plus importants, ce qui diminuerait l'effet des éléments les plus grossiers sur les équilibres pondéraux et pourrait améliorer la prévision de la rétention du substrat non remanié par celle de ses éléments. Néanmoins, les résultats de la méthode testée sont très prometteurs. Les écarts entre les courbes reconstituées et sur substrat non remanié sont nettement plus faibles que ceux enregistrés entre les protocoles précis (mesure en continu) et les différents protocoles ASVE et ADIVET.

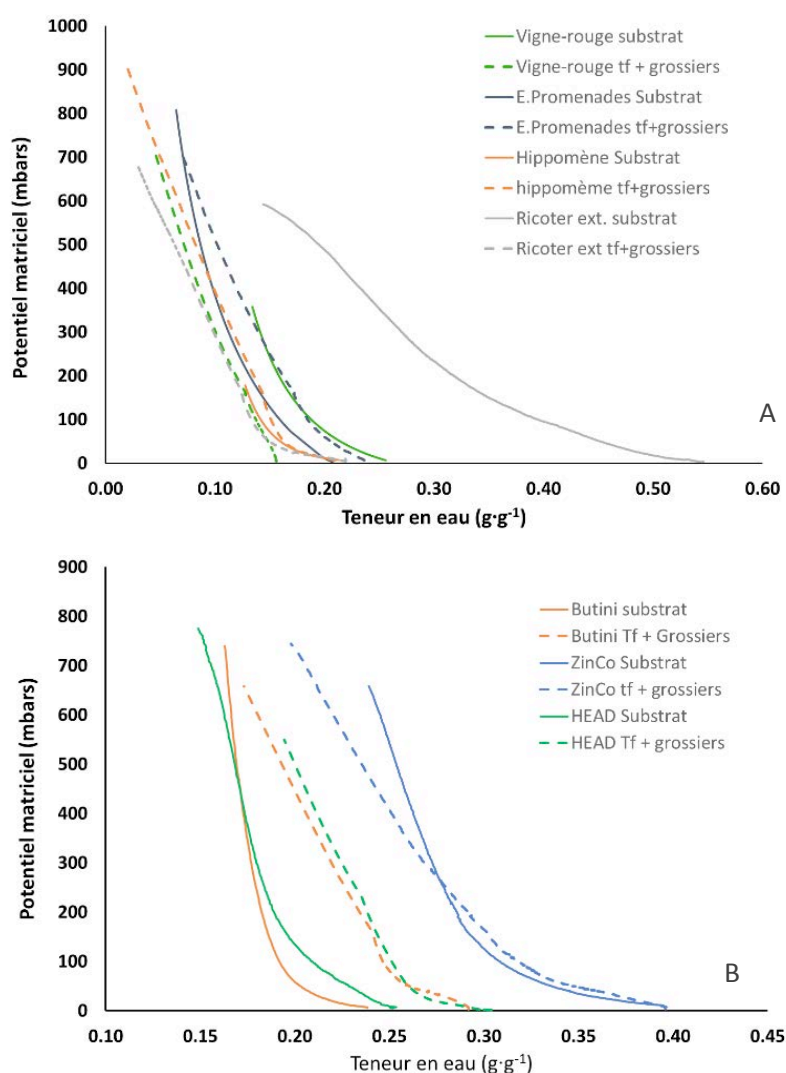


Figure 11. Comparaison entre courbes de désorption sur substrat non remanié et reconstitution à partir des courbes terre fine + grossiers sur toitures extensives. A : substrat pouzzolane ; B : substrat tuile.

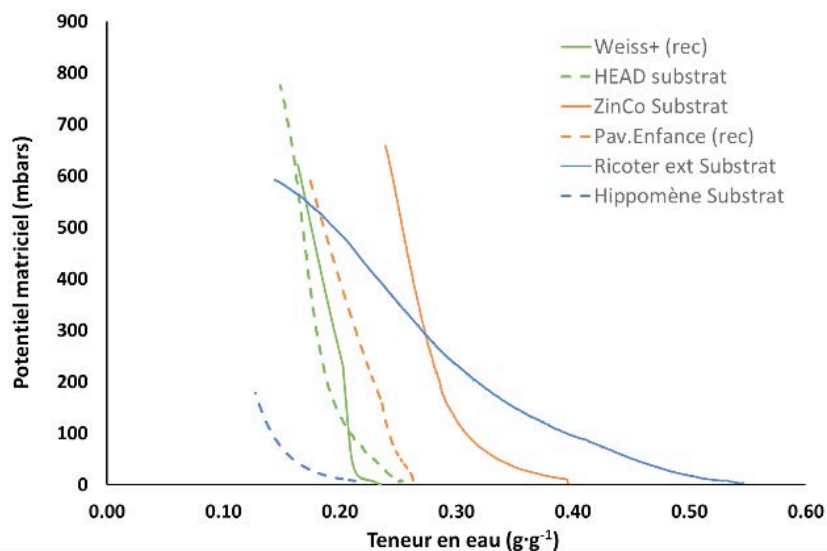


Figure 12. Comparaison entre substrat neuf et substrat de toiture homologue plus ancien.

Ce chapitre nous permet d'avoir une vision d'ensemble sur les substrats de toitures extensives étudiées ici. Nous relevons de fortes divergences de résultats entre les différents protocoles : ASVE, ADIVET et désorption. Les mesures de rétention en eau des éléments grossiers s'accordent néanmoins sur une plus grande rétention des éléments tuile. Les méthodes proposées par l'ASVE et ADIVET ne semblent pas prendre en considération tous les éléments nécessaires et les résultats obtenus, affectés de forte variabilité, nous semblent douteux. La reconstitution de la rétention en eau d'un substrat par l'addition de la rétention de la terre fine et des éléments grossiers est une piste intéressante en raison de sa simplicité. Enfin, il est important de relever que les substrats neufs retiennent beaucoup plus d'eau que les substrats évolués.

3.1.3 Bilan hydrologique

Débits

Les mesures de débit débutent à différentes périodes pour toutes les toitures. Pour des raisons pratiques, la période de mesure analysée ici se déroule du 16.04 au 30.09 2015 pour 4 des 5 cinq toitures étudiées. Les mesures sur la toiture des HUG se terminent plus tôt, le 12.09.15. Les fortes précipitations du 13.09 ont ennoyé le système de mesure mis en place, ne permettant pas de prendre en compte les données. Durant la période de mesure (16.04 au 30.09 2015), il est tombé en moyenne 430 mm de pluie. Plus exactement, 407.74 mm pour l'EMS de la Rive, 417.2 mm pour les toitures de la HEAD, de l'Europe et des HUG et 463.8 mm pour l'EMS des Marronniers. Les conditions météorologiques de l'année 2015 furent particulières avec une fin de printemps enregistrant des intensités de précipitations record en suisse et un été caniculaire. L'excédent thermique s'est élevé à 2.4 °C par rapport aux normes. A Genève, du 1 au 7 juillet, la valeur moyenne de température mesurée fut de 36.7 °C. L'année 2015 se démarque par un manque de précipitations. Le mois de septembre à connu cependant des précipitations excédentaires (météo suisse, bulletin climatique 2015).

Les mesures de débits cumulées au cours du temps sont disponibles en Annexe III pour chacune des 5 toitures étudiées.

Il est intéressant de s'arrêter un instant sur les pourcentages moyens d'abattelements des eaux météoriques par les toitures (Tableau 4). Ce pourcentage est calculé au 12.09.15 afin d'avoir une

comparaison entre toutes les toitures. Il est calculé comme le pourcentage d'eau qui est reçu sous forme de pluie mais qui ne s'écoule pas dans le réseau. Bien entendu, ce pourcentage moyen se construit aussi sur des événements dont certains peuvent peser lourd dans le bilan (Figure 13, ci-après).

Tableau 4. Précipitations et débits totaux ainsi que le pourcentage d'abattement sur chacune des 5 toitures étudiées sur la période du 16.04 au 12.09 2015.

Toitures	Cumul précipitations (m ³)	Débits totaux (m ³)	% d'abattement
HEAD	176	41	76.9
EMS RIVE	623	259	58.5
Europe	159	43.7	72.5
HUG	331	146	55.8
EMS Marronniers	36	13	64.6

Selon ces cumuls, la toiture la plus efficace en termes de rétention est la toiture de la HEAD avec 76.9% d'abattement des précipitations. Notons la différence bien marquée avec la toiture de l'EMS de la Rive car toutes deux ont le même type de substrat : matériaux grossiers unique en tuiles et faible pourcentage de terre fine dans les deux cas avec 13.7 % (m/m) pour la HEAD et 9.5 % (m/m) pour l'EMS de la Rive. Néanmoins, leur pourcentage d'abattement diffère de plus de 20 %. Cette différence peut trouver une explication quant à la différence de profondeur du substrat. En effet, la toiture de la HEAD s'aménage en un milieu irrégulier avec une profondeur variant de 6 à 12 cm. La toiture de l'EMS de la Rive est, elle, beaucoup plus régulière avec une moyenne de 6 cm. Il est néanmoins surprenant que la toiture de l'EMS de la Rive, retienne un pourcentage d'abattement inférieur à celui de l'EMS des Marronniers. Ce dernier étant composé de 91 % (m/m) d'éléments grossiers (majoritairement de la pouzzolane cette fois) soit 9 % (m/m) de terre fine et d'une épaisseur de substrat moindre (3.5 cm en moyenne). Il est possible que cette différence de comportement soit due aux sous couches, informations non disponible faute de pouvoir démonter la toiture.

Les toitures de l'école de l'Europe et des HUG ont un pourcentage d'abattement bien différent elles aussi, avec respectivement 72.5 et de 55.8 %. Ces deux toitures sont pourtant assez semblables visuellement et en termes de type de substrat avec néanmoins une forte différence de pourcentage de terre fine soit 36.6 % (m/m) et 71.3 % (m/m) et pour respectivement la toiture de l'Europe et celle des HUG. Cet écart de 25 % est donc intrigant. De nouveau, on voit que la toiture présentant le plus d'éléments grossiers assure le plus fort taux d'abattement. Notons aussi que les deux toitures ont une couche de drainage (billes d'argiles). La forte différence entre les deux toitures peut également s'expliquer par une variation de profondeur du substrat, avec 14 cm en moyenne sur la toiture de l'Europe et 10 cm sur celle des HUG.

Les normes FLL estiment pour les toitures extensives un abattement annuel de 40 à 60 %. Les 5 toitures extensives étudiées ici entrent dans cette norme.

Comme la Figure 13 nous le montre, les écarts de pourcentage moyen d'abattement entre les toitures se révèlent lors de quelques événements précis (entourés en rouge). Les fortes précipitations du mois de mai (25.04 au 07.05) engendrent des réponses très similaires sur toutes les toitures avec de forts débits hormis sur la toiture de la HEAD qui se distingue par une plus grande capacité de rétention.

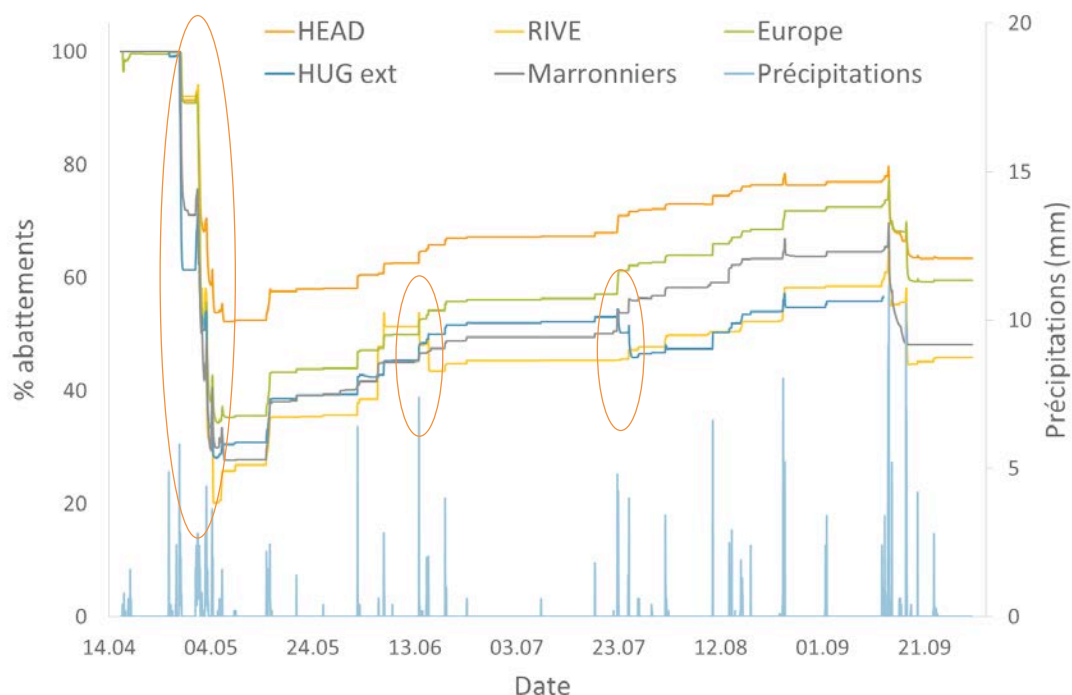


Figure 13. Pourcentage d'abattement moyen des débits sur 5 toitures extensives du 14.04 au 30.09 15. Encerclé de rouge, les précipitations ayant un effet sur le pourcentage d'abattement annuel.

Ce sont les précipitations du 13 au 15.06.15 qui font chuter le pourcentage d'abattement de l'EMS de la Rive avec un taux d'abattement passant de 50 à 40 %. On enregistre à cette période des intensités pluviales plus fortes sur la toiture de l'EMS de la Rive (25.2 mm/h versus 6 mm/h pour les autres toitures). Puis ensuite les précipitations du 22 au 25.07.15 ont le même effet sur la toiture des HUG (ext.). Les intensités pluviales ne sont pas disponibles pour cette toiture.

Il semble donc que les différences de taux d'abattement entre les toitures soient dues à des accidents ponctuels. En occultant les trois événements exceptionnels nous pouvons voir que les 5 toitures étudiées ici réagissent de manière très similaire, avec un taux d'abattement moyen de l'ordre de 70% hors événement exceptionnel.

Temps de retard et écrêtage

Le temps de retard des 5 toitures étudiées est évalué en moyenne entre 3 et 5 heures. Les maximums sont mesurés 12h après le début d'une pluie. La moyenne des temps de retards observés sont équivalents d'une toiture à l'autre. Ceux-ci dépendent bien sûr de l'état de saturation du substrat et de l'intensité pluviale. La Figure 14 montre le temps de retard des débits mesuré sur la toiture de l'EMS des Marronniers

Dans le cas de la toiture des Marronniers ci-dessus (Figure 14), les débits de pointe sont écrêtés de 50 à 80 %. Ce cas est parfaitement représentatif des valeurs moyennes d'écrtage des débits de pointe mesuré sur les 4 autres toitures extensives. Les maximums et minimums enregistrés sur les 5 toitures se situent entre 30 et 90 %.

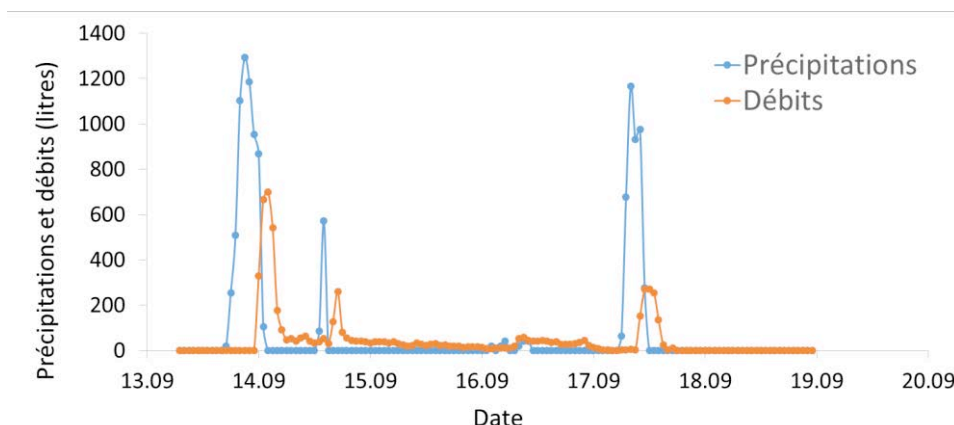


Figure 14. Illustration du temps de retard mesuré sur la toiture de l'EMS des Marronniers.

Les temps de retards mesurés dans cette étude paraissent particulièrement longs par rapport aux valeurs renseignées dans la littérature. Dans leur revue sur les performances hydrologiques de toiture, Li et al. (2014), trouvent en moyenne des temps de retards mesurés entre 0 et 30 minutes. Rappelons néanmoins que la majeure partie des études sur toitures végétalisées se font sur des prototypes de petite dimension, conçus pour l'expérience, reproduisant rarement les conditions trouvées sur le terrain. De plus, les pentes des toitures étudiées ici (pour celles dont l'information était disponible) sont particulièrement faibles, situées entre 0 et 1.5%, ne favorisant pas un drainage rapide. L'écrêtage des débits de pointe constaté sur les toitures extensives se situe dans la gamme des valeurs proposées par la littérature à savoir entre 22 et 93 % avec une moyenne de 65% environ. (Li et al., 2014).

3.1.4 Evapotranspiration réelle et potentielle

L'ETR a été déduite à partir des données de teneur en eau du substrat au cours du temps, durant des périodes sans débit ni précipitation avec un potentiel inférieur à 1 bar (donc bonne disponibilité de l'eau). Ceci nous permet d'avoir pour quelques périodes une évaluation de l'ETR pour chacune des 5 toitures extensives étudiées. Malheureusement seules deux périodes de mesure d'ETR sont identiques sur toutes les toitures nous permettant ainsi une comparaison (Figure 15). Notons néanmoins, que le potentiel matriciel (inscrit au-dessus des colonnes) n'est pas le même et n'évolue pas de la même manière sur chacune des toitures compliquant de ce faite une réelle comparaison de l'ETR. Les valeurs d'ETR ont pu être comparées à celles d'ETP calculées à l'aide la formule de Penman-Monteith selon la FAO (soit pour une surface de référence (herbe) bien arrosée) en utilisant les données de Météo Suisse ou bien, sur les données fournies par la station météo sur le toit de la HEAD.

L'ETP calculée à partir des paramètres mesurés sur la toiture de la HEAD par l'équipe thermique se trouve plus de deux fois supérieure à celles données par Météo Suisse (station Cointrin, évaporation de référence FAO). Il aurait été judicieux de comprendre la raison de cette divergence et de mettre en lumière le/les paramètres induisant cet écart. Néanmoins, il est important de relevé ici que la station météo sur la toiture de la HEAD se trouvait en bordure de toit, et pas à 2 m du sol comme le préconise la FAO. Pour ces raisons, ce sont les données de Météo Suisse qui ont été utilisées pour les comparaisons ETP/ETR en Figure 15.

La Figure 15 montre l'ETR des 5 toitures suivies sur deux périodes du 25.05 au 29.05 et du 19.06 au 23.06 2015. Les chiffres au-dessus de chaque colonne sont les moyennes journalières de potentiel matriciel en cbars. Durant ces périodes le potentiel matriciel varie entre 5 et 130 cbars.

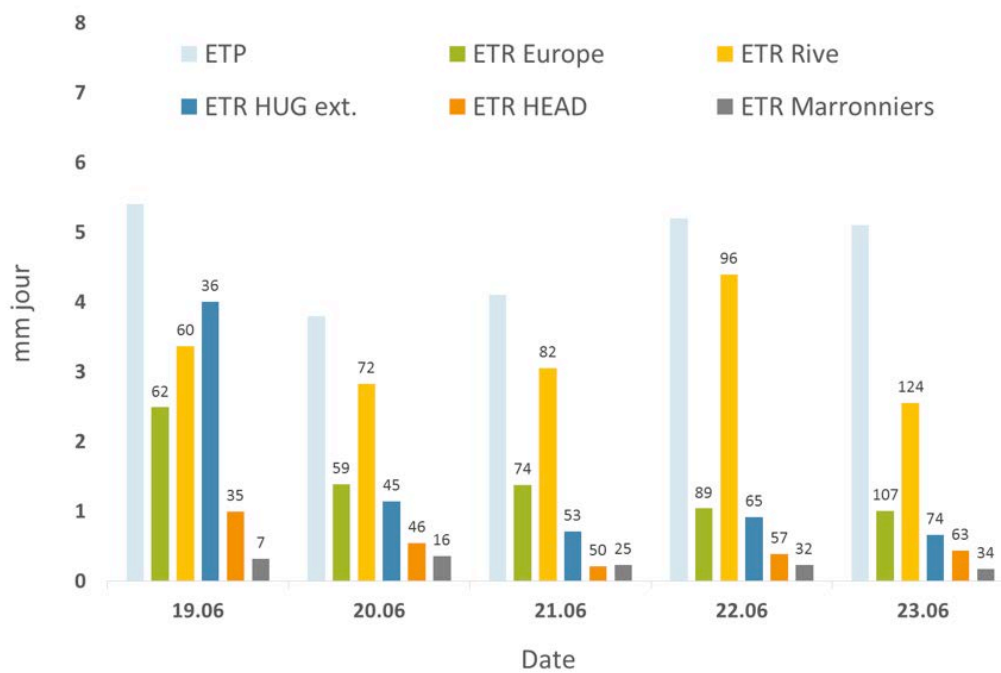
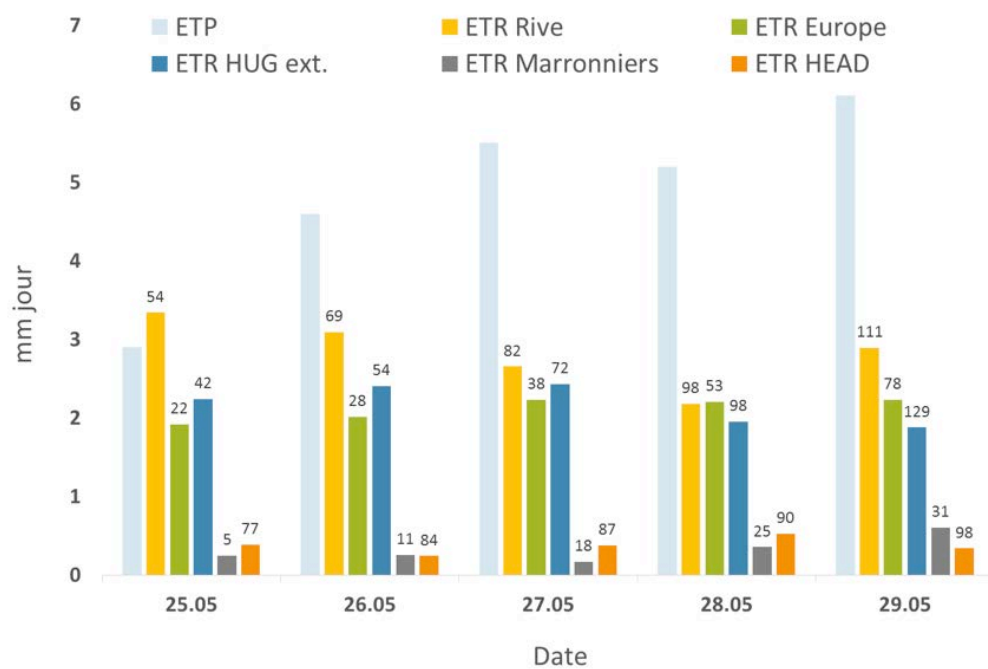


Figure 15. Comparaison sur une même période des évapotranspirations réelles (ETR), mesurées sur 5 toitures extensives et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) (FAO, Météo Suisse). Les chiffres au-dessus du taux d'ETR correspondent à la moyenne du potentiel matriciel de la journée en cbar.

On note une ETR globalement bien plus réduite que l'ETP avec une moyenne de 1.48 mm jour⁻¹ versus 4.79 mm jour⁻¹ pour l'ETP menant à une différence de 70 % sur les deux périodes comparées. Ces résultats ne sont pas étonnants, rappelons l'ETP ne tient pas compte de la teneur en eau du sol (considérée comme abondante) et est calculée pour une surface de référence (herbe, gazon), ce qui n'est pas le cas des toitures végétalisées.

De manière plus générale, les moyennes d'ETR mesurées sur la saison de végétation (mars-septembre) sur chacune des toitures sur un potentiel matriciel variant de 15 à 100 Cbars est dans l'ordre croissant de: 0.45 mm pour l'EMS des Marronniers, 0.94 mm pour la HEAD, 1.94 mm pour la toiture des HUG, 2.36 mm pour l'école de l'Europe et 3.21 mm pour l'EMS de la Rive. Les deux premières toitures, à savoir celle des Marronniers et de la HEAD sont constituées principalement de mousses et de sedums connus pour leur tolérance à la sécheresse (VanWoert et al., 2005). Il n'est donc pas étonnant que ces deux toitures figurent en bas de la liste. Les valeurs d'ETR paraissent néanmoins faibles par rapport à la littérature située entre 1 et 3 mm (Marasco et al., 2015). Les toitures des HUG et de l'école de l'Europe sont des toitures avec une épaisseur de substrat ainsi qu'une végétation de type herbacée plus importante. La toiture de Rive est en tête de liste avec une végétation abondante de type graminée (*festuca* sp.).

Il est intéressant de remarquer l'influence du type de substrat dans les mesures d'ETR. L'EMS de la Rive, au substrat tuile, est la toiture sur laquelle le plus haut taux d'ETR est mesuré. Ceci n'est pas le cas de la toiture de la HEAD (substrat tuile également) qui révèle des taux d'ETR très bas. Ceci serait dû à sa végétation principalement constituée de sedums. De plus, au milieu de l'été, l'entretien a enlevé plus de la moitié de la végétation, laissant la toiture quasiment nue. Les autres toitures, au substrat de type pouzzolane pour l'EMS des Marronniers et mélange pouzzolane/ argile pour les HUG et l'Europe ont un taux d'ETR globalement plus faible.

La Figure 16A montre le cumul de l'ETR des 5 toitures extensives sur une même période avec leur réserve en eau correspondante (mesure ASVE). Il est ici intéressant de voir que la réserve en eau mesurée ne correspond pas à celle utilisée par les plantes qui se reflète en ETR. Elle est en majeure partie surestimée, de 93, 68 et 35 % respectivement pour la HEAD, l'EMS des Marronniers et la toiture des HUG, mais se trouve sous-estimée sur la toiture de l'Europe (16 %) et de l'EMS de la Rive (38 %).

La Figure 16B représente également le cumul de l'ETR avec cette fois les valeurs de réserve en eau mesurées par désorption. Les résultats sont plus proches avec néanmoins des valeurs globalement sous estimées (entre 7 et 45 %). La toiture de l'EMS de la Rive est, elle, très fortement en dessous avec plus de 95 % de différence mesurée entre la réserve en eau utilisée par les plantes (ETR) et celle mesurée via la désorption. La valeur utilisée pour la toiture de l'Europe est celle mesurée selon le protocole ASVE car les mesures de désorption sur le substrat complet non remanié n'ont pu être possibles.

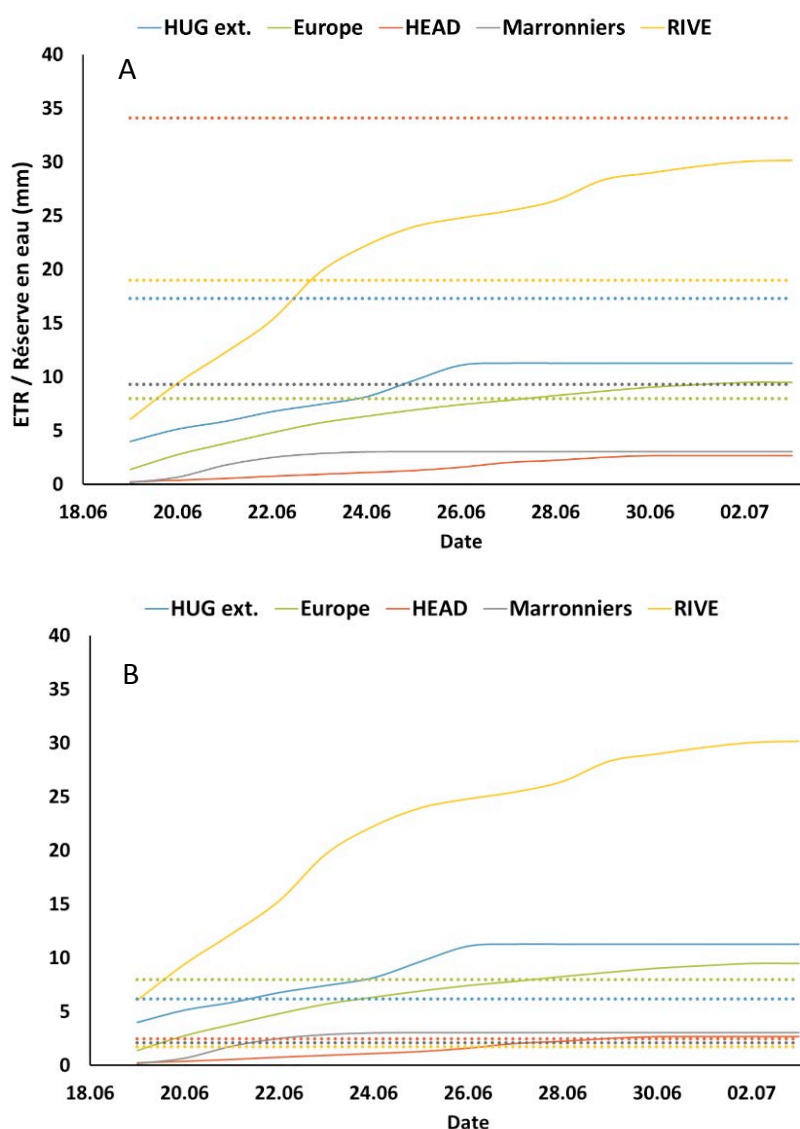


Figure 16. Cumul de l'ETR sur la période du 19.06 au 03.07 2015. En traitillé de la même couleur la réserve utile de chacune de toiture (en mm). A : mesure de réserve en eau selon mesure ASVE, B : selon désorptions

Ce chapitre nous donne un aperçu du comportement des toitures extensives. Certains résultats sont étonnants et demandent approfondissement. En effet, nous avons pu voir par exemple que la rétention en eau mesurée sur le substrat des HUG (cf Tableau 3) se trouve être la plus élevée. Cependant, nous observons que cette même toiture fait partie de celles avec le plus faible pourcentage d'abattement (cf Tableau 4). La toiture de l'EMS de la Rive a le plus haut taux d'ETR. Cependant, sa capacité de rétention est l'une des plus faibles, avec un pourcentage d'abattement à 58.5 %. A l'inverse, la HEAD et de l'EMS des Marronniers, ont une très faible évapotranspiration mais un grand potentiel de rétention en eau, respectivement 76.9 et 64.6 %.

Il est ainsi difficile aujourd'hui d'évaluer le rôle de l'épaisseur des substrats, de leur teneur en terre fine et matière organique sur l'ETR et la rétention en eau. Nous avons pu mettre en lumière plusieurs

pistes néanmoins. Le type d'éléments grossiers paraît effectivement un élément important qui ressort fortement dans cette étude. La tuile semble avoir un rôle important dans la rétention en eau.

La profondeur du substrat semble aussi être un élément important. Ce dernier augmente la réserve en eau potentielle et réduit les périodes de stress hydriques (Young et al., 2014). Néanmoins, une plus grande profondeur de substrat induit une augmentation de terre fine, de MO, etc. Il serait donc intéressant de comprendre lesquels de ces paramètres ont une influence sur la rétention en eau.

La comparaison entre les différents protocoles nécessite plus de répliques car les valeurs divergent énormément. Les protocoles ASVE et ADIVET ne paraissent pas totalement adaptés à la mesure de rétention en eau de substrat de toitures.

3.2 Diagnostic d'évolution des substrats

Le diagnostic de l'évolution des substrats est une partie délicate. La comparaison temporelle entre substrats n'est pas évidente étant donné le peu d'information que nous avons pu obtenir sur l'historique des toitures. Seul 3 substrats peuvent être comparés entre eux : Weiss+ et la toiture de la HEAD (2010) ; ZinCo et le pavillon de l'enfance (2011) ainsi que Ricoter et l'espace Cube Hippomène (2008). Ces trois toitures sont relativement récentes. Entre substrat neuf et substrat de toiture, on observe visuellement une disparition des éléments organiques frais après quelques années avec une augmentation des particules fines (La profondeur du substrat semble aussi être un élément important. Ce dernier augmente la réserve en eau potentielle et réduit les périodes de stress hydriques (Young et al., 2014). Néanmoins, une plus grande profondeur de substrat induit une augmentation de terre fine, de MO, etc. Il serait donc intéressant de comprendre lesquels de ces paramètres ont une influence sur la rétention en eau.). Ceci s'observe également par une nette augmentation (plus de 30 %) de la terre fine sur les toitures de la HEAD et de l'espace Hippomène par exemple. La comparaison des courbes de désorption entre substrat neuf et substrat de toiture appuie cette conclusion.

Rappelons également que la comparaison des substrats neufs à leur homologue plus ancien a permis de mettre en évidence une tendance des substrats plus anciens à retenir moins d'eau qu'un substrat neuf. La MO, plus importante dans les substrats neufs, permet une plus grande rétention en eau.

L'observation à la loupe binoculaire montre également des revêtements organiques et des micro-agrégats sur les éléments grossiers. Une étude en microscopie électronique et une caractérisation biochimique de la matière organique par spectroscopie serait des perspectives intéressantes pour comprendre les processus d'évolution en jeu.

4. Conclusion et perspectives

L'étude de toitures végétalisées préexistantes en ville de Genève a permis de mettre en lumière de nombreux aspects intéressants. L'étonnante rétention en eau des substrats à base de tuiles est l'un des résultats probants de cette étude. Il serait intéressant d'approfondir ces questions car d'une meilleure rétention en eau découle une végétation plus abondante, une ETR plus importante, etc, augmentant ainsi de manière générale les bénéfices associés aux toitures végétalisées.

Dans cette étude, les toitures extensives étudiées opèrent un abatement des pluies de 45 à 63 % sur la période de végétation (avril-septembre 2015) démontrant leur intérêt dans la gestion des eaux urbaines. L'écêtement est important, et le temps de retard plus élevé sur ces toitures réelles que sur les toitures modèles utilisées dans la littérature. La comparaison des protocoles ASVE et ADIVET aux courbes de désorption met en évidence certains problèmes de méthodologie qu'il serait intéressant d'approfondir. Les temps de saturation ainsi que ceux de ressuyage peuvent être remis en question. Des répliques doivent être effectués. Néanmoins, selon nos résultats, les protocoles actuellement proposés par l'ASVE et ADIVET surestiment grandement les valeurs de rétention en eau des substrats. Le suivi hydrologique de toiture par sonde watermark® a permis, en période de sécheresse, d'estimer l'évapotranspiration réelle de toitures extensives. Cette méthode, assez simple, permet de manière assez efficace d'avoir un ordre de grandeur de l'ETR sur de courtes périodes. Il serait intéressant à présent d'explorer les relations ETR/ETP en discutant les paramètres de l'équation de Penman-Monteith (FAO Smith et Allen 1992).

Le diagnostic d'évolution des substrats mérite un plus grand approfondissement avec des comparaisons plus poussées entre substrats neufs et de toiture. Une visualisation de l'agrégation et de la matière organique au microscope électronique peut être intéressante et apporter des informations plus précises sur le sujet.

Cette étude a permis de visualiser les éléments importants du substrat dans la rétention en eau de toitures. Ces derniers, tel que la proportion de terre fine, la nature des éléments grossiers, la proportion de matière organique (une fois humifiée) et l'épaisseur du substrat pourraient être utilisés à la mise en place d'un indicateur de qualité (scoring). Ceci pour permettre d'évaluer le potentiel de rétention en eau d'une toiture à partir de la mesure de ces différents éléments.

5 Références

- ADIVET, CSFE, SNPPA, UNEP. Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées (2007) Ed. n°2
- Ampin P., Sloan J., Cabrera R., Harp D. & Jaber F. (2010) Green roof growing substrates: types, ingredients, composition and properties. *Environ. Horticul* 28 pp. 244–252
- Antrop, M. (2004). Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landsc. Urban Plann.* 67, 9–26
- ASVE. Directives pour la végétalisation extensive des toitures : Capacité hydrique et degré de recouvrement de la végétation (1999)
- Baize D. (2000) Guide des analyses en pédologie INRA
- Beretta, C., Poe, S., & Stovin, V. (2014). Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *Journal of Hydrology* vol. 516, 37-49
- FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau). (2008). Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green roofing. Bonn, Germany
- Guerin I., Laperche V., Grangeon S. & Hubé D. (2014) Characterisation of mercury contaminates sites. Project No.SN-03/08
- Getter K.L., Rowe D.B & Anderson J.A. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering* 31 225-231
- Graceson A., Hare M., Monaghan J. & Hall N. (2013). The water retention capabilities of growing medias for green roofs. *Ecological Engineering* 61 328-334
- Hargreaves G. H. & Allen R. G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation, *J. Irrig. Drain. Eng* 129, 53–63
- Li Y. and Babcock R.W. (2014). Green roof hydrologix performance and modeling : a review. *Water science and technology*, 69 (4) 727-738
- Mentens J., Raes D. and Hermy M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77 217-226
- Marasco D.E., Culligan P.J. & McGillis W.R. (2015). Evaluation of common evapotranspiration models based on measurements from two extensive green roofs in New York City. *Ecological Engineering* Vol. 84, 451-462
- Massy J., Martin P. & Wyler N. (2011). Cartographie semi-automatisée des toitures végétalisées de la ville de Genève. *Géomatique Expert*, n81
- Priestley, C.H.B., & R.J. Taylor. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100:81-82

- Saadatian O., Sopian K., Salleh E., Lima C.H., Riffat S., Saadatian E., Toudeshki A. & Sulaiman M.Y. (2013). Renewable and Sustainable Energy Review 23 155-168
- Smith M., Allen R., Monteith J.L, Perrier A., Santos Pereira L. & Segeren A. (1992) Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirement – FAO Irrigation and drainage paper 56
- Speak A.F., Rothwell J.J, Lindley S.J and Smith C.L. (2013). Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Science of the total environment* 461-462 28-28
- VanWoert N.D., Rowe D.B., Anderson J.A., Rugh C.L., and Xiao L. (2005). Watering Regime and Green Roof Substrate Design Sedum Plant Growth. *HortScience* 40(3) : 659-664
- Young, T., Cameron D.D., Sorrill J., Edwards T., & Phoenix G.K. (2014). Importance of different components of green roof substrate on plant growth and physiological performance. *Urban Forestry and Urban Greening*, 13 :507-516

6 ANNEXES I : Analyses chimiques

Tableau 5. Résultats des analyses chimiques sur l'ensemble des toitures étudiées

	Analyses/ Toitures	Carbone organique %	Azote organique %	C/N	% M.O	pH	CEC (cmolc/kg)
Substrats neufs	Ricoter int.	8.9	0.50	18.9	14	7.2	23.1
	Ricoter ext.	7.5	0.30	25.8	13.3	7.2	20.3
	ZinCo	4.5	0.30	15.2	6.2	7.1	17.5
	Weiss +	5.8	0.20	34.1	8.8	7.6	16.8
Extensive <10 ans	MQ Huttins	0.8	0.01	63.8	0.7	7.7	2.0
	Promenades	2.7	0.17	15.9	3.8	7.0	12.0
	Vigne rouge	3.3	0.17	19.1	3.1	6.9	12.3
	Hippomène	2.3	0.15	15.1	2.6	7.9	7.7
	Marronniers	4.1	0.30	14.0	6.2	6.6	16.7
	Fontaines	2.6	0.10	20.3	3.3	6.6	11.3
	HEAD	6.0	0.50	11.0	9.5	7.9	25
	Pav.enf	4.6	0.37	12.3	6.3	7.2	19.0
	Rive	5.7	0.40	13.3	8.3	7.3	24.1
	Butini	7.4	0.73	10.1	8.7	7.5	29.4
Extensive >10 ans	Europe	2.6	0.20	13.5	3.3	7.1	13
	HUG	6.9	0.60	12.0	10.4	6.7	40.5
	C.S Lancy	2.3	0.08	27.7	1.8	6.8	3.8
	Piscine Onex	3.2	0.20	20.7	5.8	5.9	5.6
	La Praille	1.1	0.08	14.2	1.5	7.2	4.1
	FTI 66	2.4	0.18	13.6	3.4	7.3	8.1
	FTI 67	1.8	0.09	19.3	1.9	7.1	7.2
Intensives <10 ans	Club des ainés	6.3	0.51	12.3	9.1	7.1	32.6
	Pommiers 33	8.3	0.27	31.1	6.9	6.5	12.0
	Pommiers 33bis	4.8	0.17	28.2	6.3	6.7	13.9
	Seymaz-05	3.7	0.30	14.8	4.1	7.5	19.8
	HUG	2.9	0.20	18.2	2.7	6.2	9.2
Intensives >10 ans	Coop Augustins	3.0	0.24	12.8	3	7.3	14.6
	Zurich Assurance	4.9	0.36	13.7	5.6	7.5	24.5
	Garage Autobritt	5.5	0.43	12.9	6.1	7.4	24.7
	Horlogerie	5.1	0.38	13.4	6.6	7.2	27.0
	Petit Senn	7.4	0.50	14.7	12.7	7.5	38.5

	Analyses/ Toitures	Intensité (extrait H ₂ O)				Quantité (extrait AAEDTA)			
		P	k	Mg	Ca	P	k	Mg	Ca
Substrats neufs	Ricoter int.	14	339.7	82.3	769	255	636	395	16021
	Ricoter ext.	11.6	268.8	163.9	1165	176.4	755	424	7705
	ZinCo	11.3	190.7	126.5	654	133.7	622.0	721.0	22618.0
	Weiss +	4.9	124.8	82.2	1096	104.7	278	333	15152
Extensive <10 ans	MQ Huttins	1.3	36.6	3.1	59	97.4	195.0	46.0	1959.0
	Promenades	2.7	106.2	19.1	198	51.3	626.0	109.0	2673.0
	Vigne rouge	3.5	81.7	15.4	105	91.4	693.0	170.0	3150.0
	Hippomène	1.6	56.5	2.0	13	41.2	464.0	83.0	1778.0
	Marronniers								
	Fontaines	3.1	103.0	24.8	186	41.1	624.0	135.0	2092.0
	HEAD	5.2	75.2	19.0	377	337.0	390.0	754.0	51957.0
	Pav.enf	5.4	77.5	14.1	256	189.8	270.0	567.0	32021.0
	Rive	7.6	64	19.0	448	164.3	167	171	13877
	Butini	6.3	96.1	26.1	420	324.0	384	850.0	50568
Extensive >10 ans	Europe	6.6	42	10.7	391	47.5	114	156	15223
	HUG	8.7	18.1	24.1	499	247	60	200	10110
	C.S Lancy	1.4	45.1	3.3	22	37.9	552.0	60.0	1237.0
	Piscine Onex	2	97.1	16.1	67	21	343	161	1656
	La Praille	1.4	11.1	2.8	99	8.8	67.0	245.0	37995.0
	FTI 66	2	80.2	9.3	178	53.8	450.0	59.0	2327.0
	FTI 67	1.6	73.6	10.1	111	40.7	658.0	79.0	1785.0
Intensives <10 ans	Club des aînés	11.1	35.5	16.2	276	174.8	140.0	307.0	14569.0
	Pommiers 33	4.5	68.2	11.0	70	84.7	324.0	150.0	2010.0
	Pommiers 33bis	2.5	57.7	13.1	69	46.7	428.0	195.0	2326.0
	Seymaz-05	16	52.7	19.4	408	285	204	169	13475
	HUG	6.2	152.0	21.4	132	129.6	879.0	171.0	2080.0
Intensives >10 ans	Coop Augustins	20.5	11.8	10.0	400	32.2	44.0	79.0	8600.0
	Zurich Assurance	4.3	11.7	19.7	710	81.0	62.0	178.0	12674.0
	Garage Autobritt	19.1	36.7	26.4	822	142.0	112.0	154.0	9343.0
	Horlogerie	10.7	20.8	14.8	375	191.0	84.0	211.0	25517.0
	Petit Senn	9.7	71.7	35.7	854	115.9	155	267	24170

7 ANNEXE II : Granulométrie

Tableau 6. Granulométrie des toitures extensives, intensives et de substrats neufs

Fraction (mm)/toitures	Marroniers	E.promenade	Pte fontaine	MQ Huttins	Vigne-rouge	C.S Lancy
0.04	0.8	0.6	0.3	0.20	1.27	0.50
0.063	1.4	1.4	1.2	0.63	1.23	0.82
0.125	2.1	1.7	1.5	2.74	2.19	2.79
0.25	1.6	1.7	2.3	4.61	4.41	6.93
0.5	1.4	1.6	3.9	4.25	2.98	4.42
1	1.7	2	3.8	7.24	2.44	4.96
Total < 2mm (%)	9	9	13	19.67	14.51	20.41
2	3.1	3.8	5.9	26.69	6.99	9.83
4	37.2	23.1	17.6	23.93	7.14	19.46
6.3	50.7	64.1	63.5	29.70	71.36	50.29
Total > 2mm (%)	91	91	87	80.33	85.49	79.59
Fraction (mm)/toitures	Hippomène	FTI 66	FTI 67	Rictoter ext	HEAD	RIVE
0.04	1.62	0.24	0.13	0.09	1.05	1.60
0.063	1.70	0.48	0.31	0.32	1.42	1.80
0.125	2.46	1.34	1.84	1.24	2.40	1.60
0.25	5.44	4.55	7.01	3.78	4.35	1.50
0.5	3.90	7.64	6.71	2.85	1.89	1.30
1	5.00	6.75	8.87	3.03	2.61	1.70
Total < 2mm (%)	20.11	21.00	24.88	11.30	13.70	9.50
2	12.11	17.88	15.62	9.36	7.44	3.30
4	15.40	23.06	22.28	23.02	9.29	22.50
6.3	52.38	38.05	37.22	56.32	69.57	64.70
Total > 2mm (%)	79.89	79.00	75.12	88.70	86.30	90.50
Fraction (mm)/toitures	Butini	Pav enfance	Weiss+	Zinco	ONEX	HUG ext.
0.04	0.08	0.36	1.02	0.42	0.30	0.20
0.063	0.23	0.83	0.83	1.17	0.60	0.40
0.125	0.83	1.12	2.10	3.71	1.10	1.10
0.25	5.11	1.93	2.10	7.65	1.50	1.20
0.5	2.44	1.25	1.40	3.06	0.10	58.60
1	2.05	2.06	1.91	3.62	3.40	9.60
Total < 2mm (%)	10.74	7.55	9.35	19.63	7.00	71.10
2	5.24	7.28	4.63	6.69	5.00	7.90
4	9.65	16.85	13.02	11.93	25.30	12.30
6.3	74.38	68.32	73.00	61.75	62.70	8.70
Total > 2mm (%)	89.26	92.45	90.65	80.37	93.00	28.90

Fraction (mm)/toitures	Europe+	Europe-	Praille	Seymaz	Zurich	Autobritt
0.04	0.90	0.80	0.11	0.52	0.34	0.39
0.063	1.40	1.30	0.37	1.20	1.25	1.82
0.125	3.30	3.00	1.52	8.05	11.37	7.47
0.25	6.60	7.00	7.28	23.05	14.33	24.98
0.5	10.30	10.90	1.89	16.62	15.58	24.54
1	14.10	15.40	1.88	22.83	20.66	24.48
Total < 2mm (%)	36.60	38.40	13.06	72.26	63.54	83.68
2	16.00	16.00	18.80	14.02	20.26	13.44
4	35.90	32.80	54.04	9.28	10.83	2.28
6.3	11.50	12.80	14.11	4.45	5.37	0.60
Total > 2mm (%)	63.40	61.60	86.94	27.74	36.46	16.32
Fraction (mm)/toitures	Augustins	Pt Senn	Horlogerie	HUG int.	Pommier33	Pommier33bis
0.04	0.16	3.11	5.82	4.81	1.39	1.00
0.063	1.10	3.10	9.48	3.13	1.42	1.63
0.125	7.89	5.55	11.72	4.32	3.06	2.54
0.25	37.38	21.43	24.20	7.26	6.83	7.71
0.5	21.87	24.97	17.51	4.06	7.72	9.09
1	15.11	20.84	17.39	6.20	9.75	14.20
Total < 2mm (%)	83.51	79.00	86.11	29.78	30.16	36.15
2	3.51	9.02	7.47	26.98	14.85	23.23
4	2.86	6.30	4.28	29.63	20.57	17.61
6.3	10.11	5.69	2.14	13.61	34.42	23.01
Total > 2mm (%)	16.49	21.00	13.89	70.22	69.84	63.85
Fraction (mm)/toitures	Club des aînés	Ricoter int.				
0.04	1.19	2.02				
0.063	2.27	3.68				
0.125	11.35	6.27				
0.25	29.72	11.15				
0.5	26.21	8.82				
1	12.75	12.67				
Total < 2mm (%)	83.50	44.62				
2	8.55	15.41				
4	5.38	23.48				
6.3	2.57	16.49				
Total > 2mm (%)	16.50	55.38				

8 Annexe III : Cumul des débits

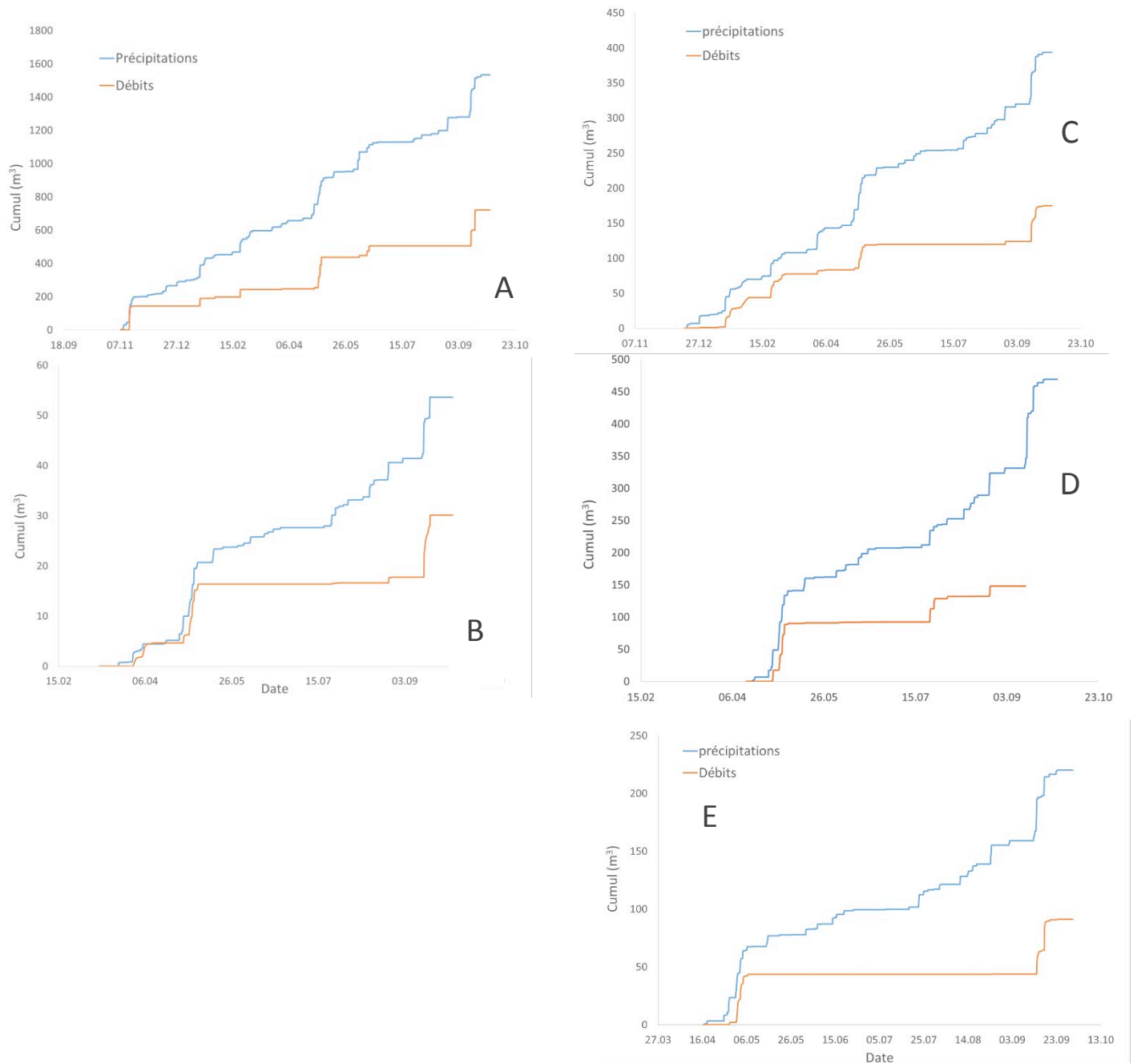


Figure 17. Cumul du débit total (Orange) et des précipitations (bleu) sur les 5 toitures extensives étudiées. A : Rive, B : EMS des Marronniers, C : HEAD, D: toiture des HUG, E : Ecole de l'Europe

Analyse de l'efficacité hydrologique d'une toiture végétalisée dans le canton de Genève

RAPPORT FINAL PROJET TVEG 2014-2016



Yverdon-les-Bains, le 26 janvier 2016

Auteurs :

David Consuegra, professeur HES

Fatimétou N'Gaidé Diouf, collaboratrice scientifique

Dr Pierre Queloz, collaborateur scientifique

EC+G

Route de Cheseaux 1
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. +41 (0)24 557 63 30

Fax +41 (0)24 557 64 04

E-mail: info@heig-vd.ch

RÉSUMÉ

Le phénomène de l'urbanisation engendre une augmentation des surfaces imperméables telles que routes ou bâtiments, au détriment d'espaces cultivés, de forêts ou de prairies. Une évacuation des eaux de ruissellement doit donc être prévue, ce qui engendre des coûts importants et peut poser des problèmes lorsque le réseau est déjà chargé. Parmi les mesures développées afin de limiter le volume d'eau ruisselée et de laminer les pics de débit à évacuer, les toitures végétalisées sont étudiées dans ce rapport. Une toiture végétalisée consiste principalement en une couche de substrat d'épaisseur variable permettant le stockage temporaire de l'eau pluviale, qui sera soit évacuée par un drainage de fond, par des drains de surface, ou restituée dans l'atmosphère par évaporation ou transpiration des végétaux qui se développent sur le substrat.

Le fonctionnement hydrologique de la toiture végétalisée semi-intensive du cycle d'orientation de la Seymaz à Genève a été étudiée à l'aide de mesures pluviométriques et débitométriques du drain pendant une période de 6 ans. L'analyse de ces données a montré une forte différence saisonnière de la réponse, avec une évacuation de l'eau pluviale par le drain de l'ordre de 80 % en hiver, alors qu'en été, toute l'eau pluviale est stockée dans le substrat et restituée dans l'atmosphère par évapotranspiration. Une modélisation de ce système a permis de tester la réponse de la toiture avec des pluies stochastiques représentatives de la région pendant une période de 20 ans, et de comparer cette réponse avec celle d'une toiture conventionnelle modélisée. La réponse de la toiture de la Seymaz confirme le bilan calculé avec la période de mesures, avec annuellement 60 % du volume de précipitation évaporé et transpiré et 40 % restitué au drain, contre 80 % d'évacuation au drain pour une toiture conventionnelle.

L'analyse de données d'autres toitures végétalisées en région genevoise, toutes extensives (épaisseur de substrat plus faible et surtout absence de drainage de fond) a permis de comparer leur efficacité hydrologique par rapport aux prédictions de la réponse du toit vert semi-intensif de la Seymaz pour la même période (la période de mesure des toits verts extensifs étant très courte, les résultats sont à prendre avec réserve). La part de précipitation évacuée au drain varie entre 15% au minimum pour le collège de la Seymaz et un maximum de 45 %. Une modélisation de ces toitures et une simulation de leur réponse à des séries de pluies stochastiques de 20 ans ont également été effectuées. Les résultats indiquent des restitutions au drain entre 40 % (Seymaz) et 65 %, avec des performances en terme de limitation de débit nettement plus faibles pour une des toitures végétalisées intensives (la période de retour d'un débit de pointe de $20 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ passe de l'ordre d'une année à un mois). Les différentes réponses s'expliquent essentiellement par la capacité de stockage (épaisseur et paramètres de rétention du substrat) dans le cas des toitures extensives dont le fonctionnement est similaire à celui des toitures piscines, alors que le comportement de la couche de drainage de fond devient également un paramètre important dans le cas de la toiture semi-intensive en permettant - mais en limitant - l'évacuation de l'eau pluviale par le drain avant que le substrat soit saturé.

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	3
2. PROBLEMATIQUE	3
3. SYNTHESE DE LA LITTERATURE EXISTANTE	5
3.1 <i>Conceptualisation du système</i>	5
3.2 <i>Evaporation et transpiration</i>	6
4. ETUDE DU CAS D'UNE TOITURE VEGETALISEE INTENSIVE : LE CO DE LA SEYMAZ	7
4.1 <i>Méthodologie</i>	8
4.2 <i>Analyse du comportement de la toiture végétale</i>	9
4.3 <i>Modèle hydrologique</i>	11
4.4 <i>Simulations avec les pluies stochastiques</i>	17
5. COMPARAISON DE L'EFFICACITE HYDROLOGIQUE DE 4 TOITURES VEGETALISEES EN REGION GENEVOISE	22
5.1 <i>Description des toitures et données à disposition</i>	22
5.2 <i>Comportement hydrologique des toitures</i>	23
5.3 <i>Modélisation des toitures extensives</i>	25
5.4 <i>Simulation à long terme avec des pluies synthétiques</i>	28
6. SYNTHESE ET RECOMMANDATIONS	30
7. BIBLIOGRAPHIE	32

Illustration de couverture : Vue 3D de la toiture végétalisée du collège de la Seymaz, Genève.
 Crédits Google Earth

1. INTRODUCTION

Dans les pays industrialisés, le taux d'urbanisation est toujours à la hausse. Les terres cultivées, les prairies et les forêts sont déplacées au profit des surfaces imperméables composées notamment des rues, des trottoirs et des bâtiments. Un des problèmes environnementaux majeurs de l'urbanisation est que le système hydrologique urbain doit faire face à une quantité très fluctuante des eaux de ruissellement de surface qui peuvent devenir extrêmement élevées pendant les périodes de précipitations et rester faibles pendant le reste du temps (Blanc, 2002).

Nombreuses sont les mesures qui commencent à voir le jour pour réduire le ruissellement élevé lors des pluies, pour augmenter la rétention et le stockage dans les réservoirs, les étangs et les espaces verts où l'eau peut s'infiltrer et s'évaporer.

Grâce à leur capacité de stockage, les toits verts sont l'une des mesures qui peuvent réduire de façon significative le pic de ruissellement des événements pluvieux et délester la charge rejetée dans le système d'évacuation des eaux. Cette réduction consiste à retarder le début de l'écoulement par l'absorption d'eau dans la couche végétale du système de toit vert ; à distribuer le volume total d'eau de ruissellement sur une longue période de temps (écrêter la pointe de l'hydrogramme) grâce au stockage temporaire de l'eau dans les pores du substrat ou encore à réduire le ruissellement total en retenant une partie de la pluviométrie qui sera absorbée par les végétaux.

Les toits verts se composent essentiellement d'une couche de végétation, d'une couche de substrat (où l'eau est retenue et dans laquelle la végétation est ancrée) et d'une couche de drainage (évacuant l'excès d'eau).

Principalement sur la base de la profondeur de la couche de substrat, deux types de toits verts sont distingués en Europe (Krupka, 1992; Kolb et Schwarz, 1999):

- Les toits verts **extensifs** avec une couche de substrat d'une profondeur maximale d'environ 150 mm. Les sedums constituent habituellement la majeure partie de la végétation. Ce type de toit peut également être installé sur des surfaces en pente allant jusqu'à 45° d'inclinaison.
- Les toits verts **intensifs** avec une couche de substrat d'une profondeur de plus de 150 mm. Les graminées, herbes vivaces et arbustes constituent principalement la végétation retrouvée sur ce type de toit qui est généralement installé sur des surfaces en pente de moins de 10° et, en fonction de la conception et de l'accès, peuvent être utilisés en tant que toit jardins.

2. PROBLÉMATIQUE

Dans plusieurs pays d'Europe entre autres, la gestion durable des eaux de pluie est fortement encouragée. Par exemple, au Royaume-Uni, l'Agence Environnementale promeut la mise en œuvre des systèmes de drainage durable : les « SuDS » (Sustainable Drainage System) pour la gestion des

eaux de ruissellement (Woods-Ballard et al., 2007). L'idée générale des «SuDS » est bien évidemment de favoriser la gestion durable des eaux de pluie ; ceci, idéalement le plus proche possible de la source. Par ailleurs, il est préconisé d'adopter le concept de la « chaîne de traitement » où plusieurs infrastructures durables seraient combinées pour fournir une gestion optimale des eaux de ruissellement qu'une infrastructure seule ne pourrait garantir.

L'attention est portée ici sur les toitures végétalisées. Plusieurs études ont été réalisées dans le but de quantifier leur efficacité hydrologique. Ces études ont toutes révélé que les toits verts contribuent d'une façon plus ou moins significative à la réduction du ruissellement pluvial.

Les principaux processus hydrologiques retrouvés dans le fonctionnement des toits verts sont l'infiltration de l'eau de pluie dans la couche végétale, l'évapotranspiration vers l'atmosphère, la percolation dans la couche de drainage, puis le ruissellement à la base de la couche drainante de l'eau excédentaire. Notez que le ruissellement de surface est très rarement (voire jamais) observé dans le cas des toitures végétalisées car l'eau de pluie est généralement absorbée par les racines puis évaporée avant que ce ruissellement ne se produise. Plusieurs modèles existent pour traduire ces divers processus. L'un des processus les plus complexes est celui de l'évapotranspiration qui combine l'évaporation à la surface du sol et la transpiration des végétaux. Le terme évapotranspiration potentielle fait référence à l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau (Mermoud, L'évaporation et l'interception 2009). Plusieurs chercheurs ont tenté de trouver les paramètres les plus influents ; Kelly et al. (2007) ont pu montrer que l'épaisseur du substrat n'avait que très peu voire pas du tout d'effet sur les taux d'évapotranspiration. Les conditions météorologiques locales auraient en revanche une influence primordiale. Plusieurs approches de modélisation existent pour estimer l'évapotranspiration (essentiellement empiriques), la plupart étant basées sur des paramètres hydroclimatiques mais variant considérablement dans leur complexité (Douglas, et al. 2009).

Différents modèles existent pour l'infiltration, tels que le modèle d'Horton où la capacité d'infiltration $i(t)$ dépend des capacités initiales, finales et d'une constante empirique (fonction de la nature du sol) difficile à mesurer. Par ailleurs, le modèle selon Green Ampt est basé sur la loi de Darcy et inclut les paramètres hydrodynamiques du sol tels que les charges hydrauliques totales, au niveau du front d'humidification et en surface.

La question est de savoir quelles sont les stratégies de modélisation adoptées dans les différentes études réalisées à ce sujet, les diverses hypothèses prises en compte et les principales conclusions tirées quant aux paramètres les plus influents menant à un calage adéquat du modèle simulé par rapport aux valeurs observées.

3. SYNTHÈSE DE LA LITTÉRATURE EXISTANTE

De nombreuses études présentent le comportement hydrologique et hydraulique de toitures végétalisées existantes ou de modèles expérimentaux. Toutes s'accordent généralement sur une efficacité importante en terme de rétention des eaux pluviales et donc de laminage de la réponse en terme de drainage pour ce type d'ouvrage.

3.1 CONCEPTUALISATION DU SYSTÈME

Bien que moins nombreux que ceux focalisés uniquement sur la performance de rétention des toitures végétalisées, plusieurs travaux font rapport de la calibration d'un modèle permettant de décrire le comportement hydrologique et hydraulique des toits verts expérimentaux ou réels. La plupart des récentes études analysées pour ce travail ont comme point commun la distinction de deux compartiments, le premier correspondant à la couche de substrat et le second la couche de drainage. Cette dernière est souvent représentée par une approche d'écoulement à surface libre, par exemple par onde cinématique (Carbone, et al. 2014) ou par l'équation empirique du type de Manning-Strickler comme c'est le cas dans le module LID du modèle SWMM5 (Burszta-Adamiak & Mrowiec, 2013, She et al. 2010). Certaines études décrivent également la couche de drainage comme un réservoir permettant une rétention temporaire, par exemple selon un modèle de vidange non-linéaire (Locatelli et al. 2014, Vesuviano et al. 2014).

Les modèles conceptuels utilisés pour représenter la rétention variable et la dynamique de vidange de la couche de substrat sont diverses. Plusieurs études considèrent que les précipitations (effectives) qui parviennent dans la couche de substrat sont retenues jusqu'à concurrence de la capacité au champ, au-delà de laquelle les précipitations excédentaires percolent dans la couche de drainage (ou directement dans le drain si aucune couche de drainage n'est considéré). Généralement, un délai supplémentaire est souvent représenté par une vidange de réservoir non-linéaire (Kasmin et al. 2010, Locatelli et al. 2014, Stovin et al. 2013). Le modèle d'infiltration de Green-Ampt est également largement utilisé (notamment dans le module LID de SWMM5), permettant de reproduire une diminution de la capacité d'infiltration au cours du temps (Burszta-Adamiak and Mrowiec 2013, Carbone et al. 2014, She et al. 2010) et permettant ainsi une accumulation de surface lorsque la capacité d'infiltration est atteinte. Vesuviano et al. (2014) considèrent quant à eux la couche de substrat comme un réservoir non-linéaire. Dans tous ces exemples, le flux d'évapotranspiration (lorsqu'il est considéré) est prélevé directement de ce compartiment entre les précipitations, et permet donc de rétablir un potentiel de stockage pour la prochaine pluie. Dans certains cas, un compartiment supplémentaire (souvent dit « de surface ») est considéré, par exemple pour prévoir une accumulation en surface lorsque le substrat est saturé (par ex. LID SWMM5), ou pour tenir compte de l'interception par les végétaux et l'évaporation de l'eau interceptée (Lamera et al. 2014).

Même si certains modèles décrits ci-dessus contiennent des paramètres physiques (capacité au champ, porosité, etc.), ceux-ci restent difficiles à déterminer à priori sans expérimentation directe sur des échantillons en conditions. De plus, beaucoup des modèles présentés gardent essentiellement ou partiellement des paramètres qui ne peuvent qu'être estimés approximativement grâce à d'autres études en conditions similaires, voir même des paramètres purement conceptuels uniquement identifiables par calibration (comme par exemple pour les paramètres de vidange d'un réservoir). Parmi les études citées dans ce rapport, seul Stovin et al. (2013) présente un modèle non calibré qui prend en compte une évapotranspiration corrigée en fonction de l'humidité du sol. Ce modèle a fourni de bons résultats en terme de volume de drainage annuel total et des prédictions d'écoulement événementiels sur une période de validation d'une année.

3.2 EVAPORATION ET TRANSPIRATION

La présence de végétation qui pousse sur le substrat permet, en plus de l'évaporation de surface, d'augmenter la quantité d'eau retenue qui est renvoyée vers l'atmosphère et ne participe pas au drainage, restaurant ainsi la capacité de rétention du substrat entre les événements pluvieux. En conséquence de la difficulté de mesurer directement l'évapotranspiration et des performances souvent insuffisantes des modèles d'évapotranspiration existants, bon nombre d'études contournent ce problème soit en installant des systèmes expérimentaux non plantés ou en ne s'intéressant que à la réponse hydrologique de ces ouvrages suite à un événement pluvieux, mais négligeant les périodes inter-événements (Brusztá-Adamiak & Mrowiec 2013, Carbone et al. 2014, Lamera et al. 2013, Vesuviano and Stovin 2013, Vesuviano et al. 2013). Parmi les travaux qui prennent en compte manière directe l'évapotranspiration (nécessaire par exemple pour de la simulation continue), on peut notamment citer ceux qui se basent sur le bilan de masse entre la fin et le début de l'événement suivant (Kasmin et al. 2010) ou l'utilisation de relations empiriques comme celle de Thornwaite, de Priestley-Taylor ou Penman-Monteith (Kasmin et al. 2010, Marasco et al. 2015, Locatelli et al. 2014, Stovin et al. 2013). Les méthodes empiriques permettant le calcul d'une évaporation potentielle de référence sont souvent couplées à des modèles ou des indicateurs afin de tenir de l'humidité du sol et d'un possible stress hydrique limitant ainsi l'évaporation réelle. Il a été démontré que souvent, les méthodes simples basées essentiellement sur la température ou la radiation telles que celles de Thornwaite ou de Priestley-Taylor sont plus performantes pour des systèmes pluie-débit relativement simples, et peuvent être sensiblement améliorées lorsqu'elles sont couplées avec un modèle permettant de prendre en considération l'humidité du sol comme facteur limitant (Marasco et al. 2015, Oudin et al. 2005).

4. ÉTUDE DU CAS D'UNE TOITURE VÉGÉTALISÉE INTENSIVE : LE CO DE LA SEYMAZ

La problématique est d'analyser l'efficacité hydrologique de la toiture végétalisée du collège de la Seymaz à Chêne-Bourg, en quantifiant ses impacts sur le régime hydrique du milieu récepteur et en comparaison avec une toiture traditionnelle.

Note : l'efficacité hydrologique fait ici référence à la fraction d'eau pluviale retenue puis évaporée par le toit vert (cette fraction n'arrivant pas à l'exutoire).

La toiture végétalisée à l'étude est celle du Cycle d'Orientation de la Seymaz située dans la commune de Chêne-Bourg et ayant fait l'objet d'une étude préalable réalisée par l'Etat de Genève.

La toiture végétalisée étudiée a une superficie de 8770 mètres carrés et le bâtiment a été construit en 2007. C'est une toiture dite semi-intensive avec un substrat ensemencé en graines extensives et une végétation de type prairie. La toiture est composée des couches suivantes :

- Un substrat de 21.5 cm d'épaisseur de terre végétale ayant une texture limoneuse et provenant des horizons supérieurs du sol présent sur le site avant la construction ;
- Une couche filtrante en géotextile ;
- Une couche de matériau drainant en argile expansé de 5 cm d'épaisseur ;
- Une étanchéité en PVC ayant également le rôle d'anti-racine.

Dix



Figure 2: Localisation du toit vert et de la station pluie-débit Mirany (à gauche). Drain de la toiture avec vortex (à droite)

régulateurs de débit (vortex) ont été installés dans le but de respecter la recommandation genevoise pour la gestion de l'eau. Cette recommandation (Etat de Genève 2004) impose une gestion des eaux pluviales à la parcelle avec une limite de rejet de 10 L/s/ha pour un temps de retour de 20 ans. Le système de drainage est complété par un réseau de tubes perforés qui acheminent les eaux vers dix conduites verticales, réparties sur la toiture de façon à drainer chacune un dixième de la superficie totale du toit.

4.1 MÉTHODOLOGIE

Trois principaux objectifs ont été déclinés dans le cadre de cette recherche.

Le **premier objectif** est d'analyser les données de pluies et débits de la station Mirany (Figure 2) afin de comprendre le comportement général de la toiture végétalisée.

Le **deuxième objectif** est de trouver un modèle hydrologique qui représente le mieux la réponse dudit toit face à une simulation en continu avec les pluies de Mirany. L'atteinte de cet objectif se traduira par un calage adéquat entre les valeurs de débits simulés et celles observées in situ.

Le **troisième objectif** est de simuler la réponse hydrologique de la toiture végétalisée face à un scénario de pluies stochastiques représentant 20 ans de mesures. Une toiture conventionnelle sera modélisée en guise de comparaison ce qui permettra de conclure sur l'efficacité hydrologique du toit vert étudié.

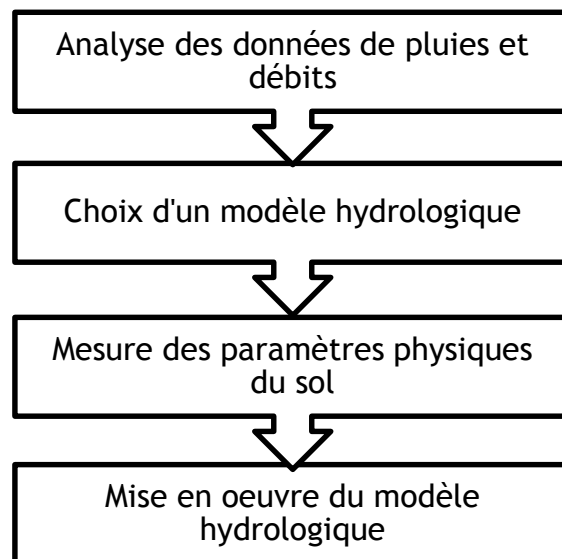


Figure 3: Méthodologie : principales étapes de l'étude.

Les principales étapes ayant conduit à l'atteinte de ces objectifs figurent sur l'organigramme.

Il est important de définir les **limites de l'étude**. Ainsi, les précipitations dont il est question n'incluent pas les précipitations solides (neige et grêle). Seront étudiés, les volumes de rétention et de ruissellement et la réduction du débit de pointe. Il est pris pour **hypothèse** que les paramètres physiques du sol, requis pour modéliser la toiture végétalisée, sont basés sur les valeurs mesurées au laboratoire corroborées par les valeurs de la littérature.

4.2 ANALYSE DU COMPORTEMENT DE LA TOITURE VÉGÉTALE

4.2.1 COMPORTEMENT GÉNÉRAL

Une première analyse des pluies et débits observés à la station Mirany a permis de dégager un modèle de comportement de la toiture végétalisée. La réaction du toit vert a été étudiée sur 6 années (de janvier 2008 à mai 2014). Le graphique suivant montre un zoom de ces pluies et débits observés, dans la période de mai 2012 à mai 2014.

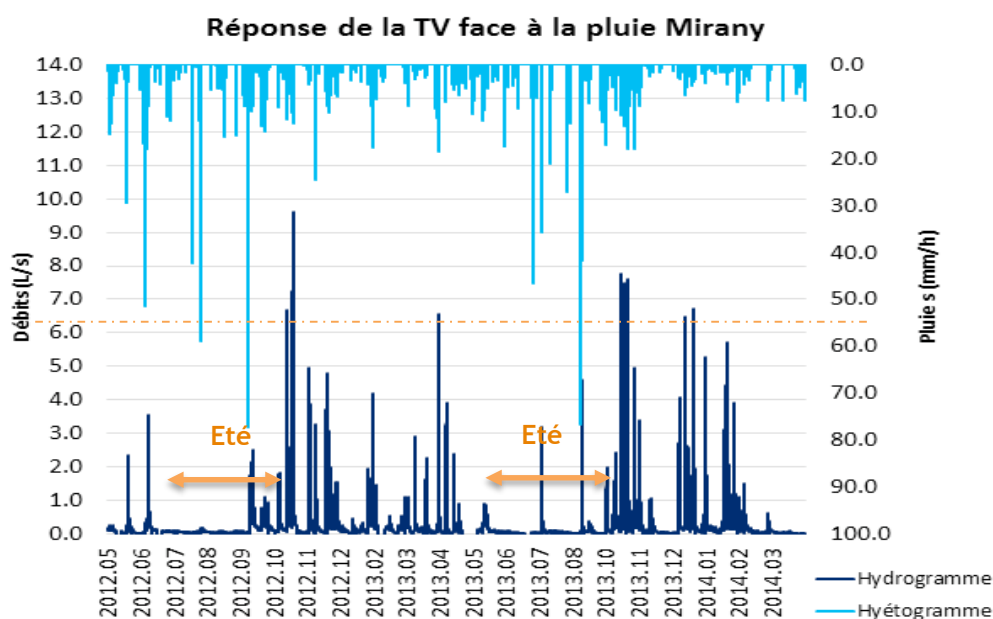


Figure 4. Réponse hydrologique de la TV face à la pluie Mirany: Pluie et débits observés.

Nous identifions clairement de très faibles débits au drain durant la période estivale (à une exception près). Cela peut s'expliquer par le fait que durant l'été, l'eau de pluie est stockée dans le sol, puis est restituée par évapotranspiration avant même d'atteindre la couche de drainage. En effet, lorsque la teneur en eau du sol est inférieure à sa teneur en eau à la capacité au champ : il n'y a pas de drainage.

Durant la période hivernale, on observe des débits à la sortie du drain. Ceci est dû à la faible évapotranspiration en hiver et à des teneurs en eau élevées (supérieures à la teneur en eau à la capacité au champ) : le sol est proche de la saturation. L'eau des pluies antécédentes s'infiltre à travers la couche de sol, s'y accumule sans être évaporée et finit par être restituée au drain.

Rappelons que la toiture végétalisée est munie de 10 régulateurs de débits ayant chacun une capacité maximale théorique de 0.9 L/s/ha. La superficie du toit étant égale à 0,877 ha, les 10 vortex régulent le débit à une capacité maximale de 7.89 L/s, soit environ 8 L/s.

Nous constatons que les débits observés sont généralement inférieurs à 8 L/s. Cependant, un événement de novembre 2012 a généré un pic de débit au drain de 9.6 L/s. Ce qui nous interroge sur le bon fonctionnement des vortex durant cette période de mesures. D'ailleurs pour l'épisode de

novembre 2012, l'hydrogramme ne montre pas le plafonnement classique que provoque ce type de régulation (voir ci-dessous).

Pour le moment, nous concluons que les vortex autorisent des rejets supérieurs à la limite imposée par la DGEau. Ce débit maximum observé de 9.6 L/s étant assez proche de la limite des 8 L/s, il se pourrait qu'il s'agisse de la marge d'erreurs liée à la calibration et/ou à la mise en place des vortex.

4.2.2 CORRÉLATION PLUIES - DÉBITS

Afin de déterminer s'il existe une corrélation entre les débits et les pluies, nous avons comparé le cumul des pluies et des débits pour chaque mois de l'année 2013.

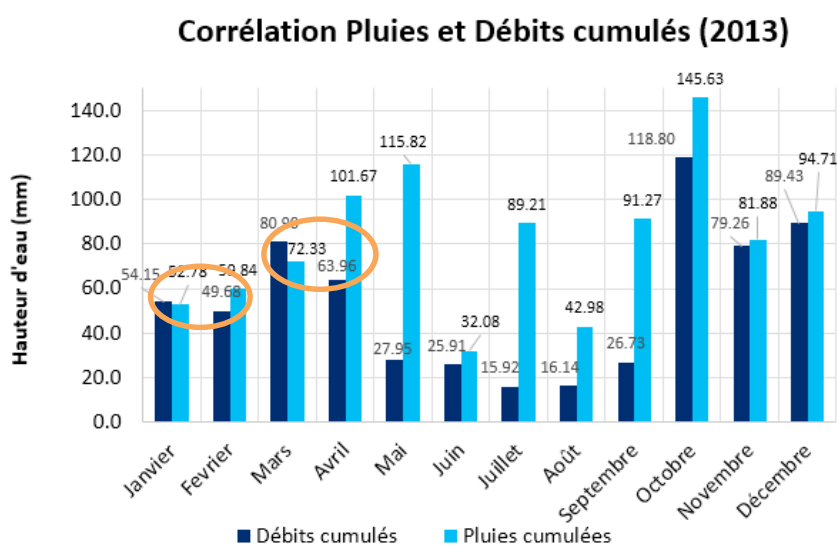


Figure 5. Corrélation Pluies- débits pour les mois de 2013

De façon générale, il faut constater que la plupart de la pluie tombée à l'échelle mensuelle en hiver est restituée au drain dans des proportions relativement importantes. Pendant cette même période hivernale, les différences entre les pluies et les débits sont mineures. Lorsque le débit dépasse la pluie (comme en janvier et en mars), nous pouvons imaginer qu'il s'agit de faibles imprécisions dans les mesures.

En période estivale, on constate que les débits restitués au drain sont faibles par rapport aux pluies totales. L'exception du mois de juin s'explique par une concentration en une journée d'une pluie qui dépasse les 20 mm (tel que constaté dans les fichiers de prévision météo) qui a probablement saturé le sol générant ainsi un débit au drain.

4.2.3 COMPORTEMENT HIVERNAL

Dans le but d'avoir une meilleure compréhension de la réponse du toit vert durant la période hivernale, nous avons sélectionné et analysé quelques événements pluies-débits.

Il a été constaté un **délai de réaction** de la toiture. L'hydrogramme de l'épisode sélectionné démarrait environ 130 minutes après le début de la pluie. Le toit vert joue son rôle tampon permettant de retarder l'arrivée de la crue. De plus, une **restitution prolongée** dans le temps est notée puisque l'hydrogramme met un certain moment à revenir à sa valeur initiale (environ 21 heures depuis la fin de la pluie).

Il a été noté qu'un cumul de 10 mm de pluie était nécessaire avant que le débitmètre n'enregistre une arrivée d'eau dans le drain. On comprend que ces 10 mm représentent la quantité de pluie nécessaire pour déclencher le drainage. Finalement, à la fin de l'épisode étudié (environ au bout d'un jour et demi) les 80 % de la pluie sont restitués au drain. Le solde est retenu dans le sol.

4.2.4 COMPORTEMENT ESTIVAL

Pour illustrer le comportement estival, nous avons représenté un événement d'été d'une durée d'environ 3 heures avec une intensité très élevée (près de 60 mm/h en 5 minutes).

Les résultats ont montré que malgré la forte intensité de la pluie, le débit à la sortie du drain n'atteint pas 0.1 L/s. La pluie cumulée de cet épisode estival atteint les 25 mm.

Suite à ce constat, on comprend que durant l'été, après une longue période de sécheresse, le toit vert a une capacité de rétention maximale.

4.3 MODÈLE HYDROLOGIQUE

Les processus hydrologiques qui régissent le modèle de la toiture végétalisée sont représentés dans le logiciel SWMM (Storm Water Management Model) par différentes couches interagissant entre elles. Ces processus sont principalement l'infiltration, la percolation, l'évaporation et le ruissellement. Les mouvements d'eau dans les différentes couches composant la toiture végétalisée se basent sur un principe simple de transfert ou bilan d'eau : « *water balance* » tel qu'illustré sur le schéma ci-dessous. Dans le cas des toitures végétalisées, il n'y a généralement pas de ruissellement de surface. On parle plutôt de ruissellement au drain (à la base du matériau drainant).

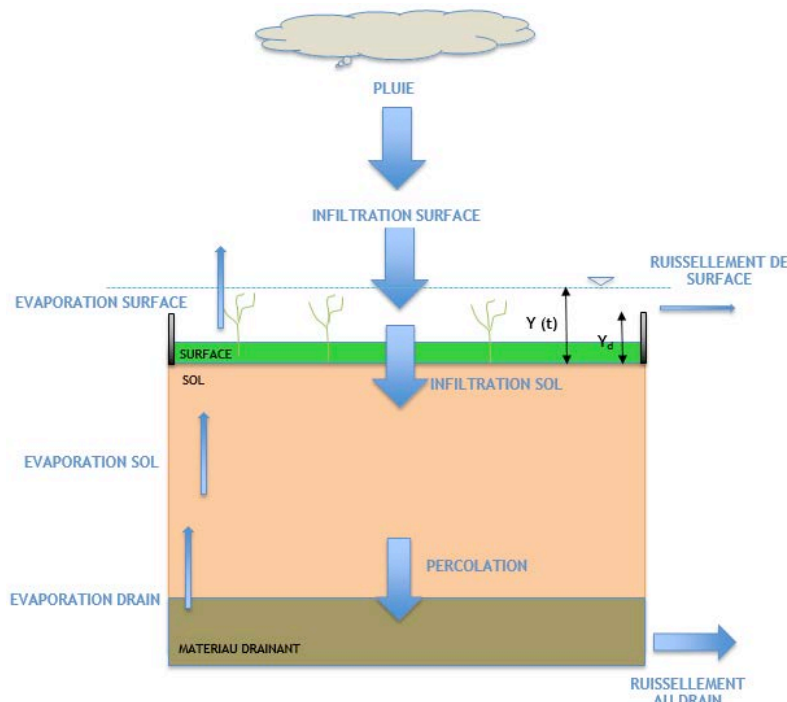


Figure 6. Fonctionnement conceptuel d'une toiture végétalisée (coupe type).

4.3.1 MISE EN ŒUVRE DU MODÈLE

La mise en œuvre du modèle a tout d'abord consisté en la saisie des inputs nécessaires à la construction dudit modèle, à savoir la géométrie de la toiture, sa composition (paramètres physiques des couches de surface, sol et drainage) ainsi que les données pluviométriques et climatologiques (taux d'évapotranspiration). Ensuite à procéder au calage du modèle et enfin à l'ajuster puis le valider.

Le point de départ de la simulation est un modèle initial représentant la toiture végétalisée et pour lequel une simulation sera réalisée avec les pluies enregistrées à la station Mirany. Ce modèle initial servira de modèle de base pour la phase de calage et sera réutilisé pour les simulations avec le scénario de pluies stochastiques (défini plus bas). Une fois le modèle initial calibré et validé grâce aux pluies et débits observés, nous avons utilisé ce modèle pour lancer les simulations avec un scénario de pluies dites stochastiques. Ce sont des pluies générées par des outils mathématiques (modèle Cluster) capables de préserver les paramètres (moyenne, écart-type et autocorrélation) utilisés par un météorologue pour caractériser les pluies d'une région donnée (Consuegra 2013).

Le calage a été effectué avec la méthode essai-erreur afin d'ajuster les paramètres non mesurés et qui ne peuvent pas être estimés de manière suffisante *à priori*. Les paramètres calibrés pour la couche de surface sont la fraction volumique de végétation et la rugosité de surface, alors que pour la couche de sol, la pente de conductivité et le potentiel matriciel au front d'humectation sont calibrés. Hormis son épaisseur, les paramètres de la couche de drainage (porosité et coefficient de rugosité) sont également calibrés puisque les fournisseurs de ce type de matériaux commerciaux ne communiquent en général pas ces caractéristiques.

Données relatives à l'évapotranspiration

En hydrologie on utilise le terme d'évapotranspiration pour exprimer la combinaison de l'évaporation directe à partir des surfaces d'eau libre et des sols nus et de la transpiration végétale (processus par lequel l'eau des végétaux est transférée dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau). (Mermoud, L'évaporation et l'interception 2009).

Seuls les phénomènes d'évapotranspiration potentielle (ETP ou ET_0) et réelle (ETR) seront employés :

- L'ETP est l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau ;
- L'ETR est la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes lorsque le sol est à son taux d'humidité naturelle.

Pour la culture de référence, le gazon, on a : $ETR \leq ETP$. (Mermoud, L'évaporation et l'interception 2009)

Le logiciel SWMM demande en input des valeurs journalières moyennes de l'évapotranspiration réelle qui ne sont nuancées que lorsque cette dernière est limitée par la disponibilité en eau dans les différentes couches qui caractérisent la toiture végétale. Faute de temps et de connaissances approfondies, des valeurs d'évapotranspiration potentielle ont été pris en compte. Les valeurs d'évapotranspiration réelle, qui pourraient être considérablement influencé par les conditions microclimatiques particulières d'une toiture ne sont pas connues au moment de la finalisation de ce rapport. Certains chercheurs (Kasmin 2010) mettent en évidence la difficulté de paramétrer ce processus, d'autant plus que dans la plupart des modèles le type de végétation n'est pas pris en compte. Vu la complexité rencontrée pour transformer les taux d'ETP (dont nous disposons) en ETR, nous avons émis une hypothèse basée sur la littérature (Mermoud, L'évaporation et l'interception 2009) qui stipule que pour le gazon (culture de référence) les taux d'ETP sont équivalents à des taux d'ETR. Notons toutefois que l'intensité de l'évapotranspiration ne change pas radicalement le comportement d'un toit vert (testé avec le modèle calibré), mais influence la durée de temps sec nécessaire pour rétablir la capacité de rétention maximale du substrat.

Données relatives à la précipitation

La précipitation, entrée sous la forme d'un hyétogramme de pluie, est la donnée d'entrée générant la réponse hydrologique de la toiture végétalisée. Rappelons que deux modélisations sont effectuées.

Pour la première modélisation de la toiture verte :

Les pluies de la station de Mirany ont été utilisées dans le but de valider par le calage les données de débits observés avec ceux simulés.

Pour la modélisation avec les pluies stochastiques :

Le point de départ pour la production des scénarii de précipitations est un travail de caractérisation des régimes de précipitations associés au climat actuel. Ce travail avait été débuté dans le cadre des modélisations effectuées pour le Canton de Genève par le biais d'une approche stochastique (Consuegra 2013). Le détail de la démarche est présenté dans le document intitulé « *La question des débits de dimensionnement* » (Consuegra 2013).

4.3.2 RÉSULTATS DE SIMULATIONS - PLUIES DE MIRANY

Le principal but de la simulation en continu avec les pluies de Mirany est de nous permettre d'une part de caler les paramètres du modèle pour reproduire au mieux les débits observés pendant une période commune d'enregistrement des pluies à la station Mirany, et de vérifier la consistance du modèle sur des événements pluvieux divers sélectionnés. Une liste des paramètres mesurés et calibrés du modèle (module LID uniquement) est visible dans le Tableau 1.

Tableau 1: Paramètres LID après calibration

	Paramètre	Valeur	Unité	Type
Surface	Hauteur des bermes	100	mm	mesuré
	Fraction vol. végétation	0.9	-	calibré
	Coeff. de rugosité (Manning)	0.15	-	calibré
	Pente de surface	0.12	-	mesuré
Substrat	Epaisseur	215	mm	mesuré
	Porosité	0.53	-	mesuré
	Capacité au champ	0.42	-	mesuré
	Point de flétrissement	0.13	-	théorique
	Conductivité hydr. à sat.	180	mm hr ⁻¹	mesuré
	Pente de conductivité	7	-	calibré
	Pot. mat. au front d'humectation	50	mm	calibré
Drainage	Epaisseur	50	mm	mesuré
	Porosité	0.35	-	calibré
	Coeff. de rugosité (Manning)	0.3	-	calibré

Résultats

Les résultats de la simulation en continu sont présentés sur la figure ci-dessous. La période de simulation est de janvier 2008 à mai 2014. A des fins de comparaison avec l'analyse précédente, nous avons zoomé sur la période de mai 2012 à mai 2014.

Il est important de souligner qu'une analyse de sensibilité a démontré qu'il était possible d'accepter plusieurs combinaisons des paramètres du modèle.

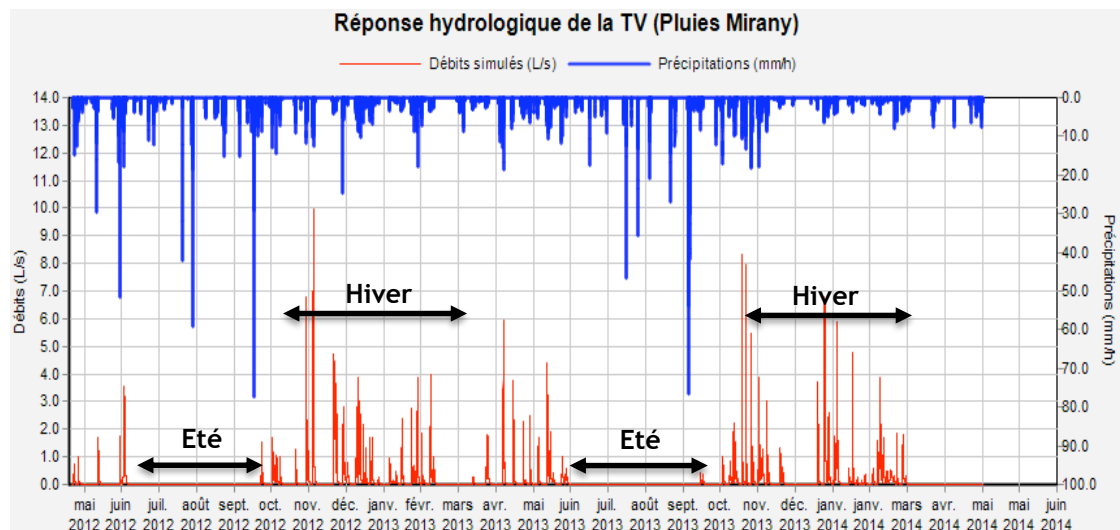


Figure 7. Réponse hydrologique de la TV face à la pluie Mirany - zoom sur 2 ans

Le modèle SWMM ne restitue pas de débit au drain durant les périodes d'été. Nous portons à l'attention du lecteur que la Figure 4 montre une à deux crues isolées en été. Nous n'avons pas pu les simuler à cause de données pluviométriques manquantes pendant ces quelques périodes.

Durant les autres périodes de l'année, la réaction du toit vert est très similaire à celle observée à la Figure 4. En effet, nous constatons ici un pic de débit de ruissellement au drain proche de 10 L/s aux alentours de novembre 2012. Les autres pointes de débits étant souvent inférieures à 8 L/s.

Pour mieux apprécier la qualité des simulations, les figures suivantes permettent de zoomer sur des périodes plus courtes et de constater la qualité des résultats obtenus.

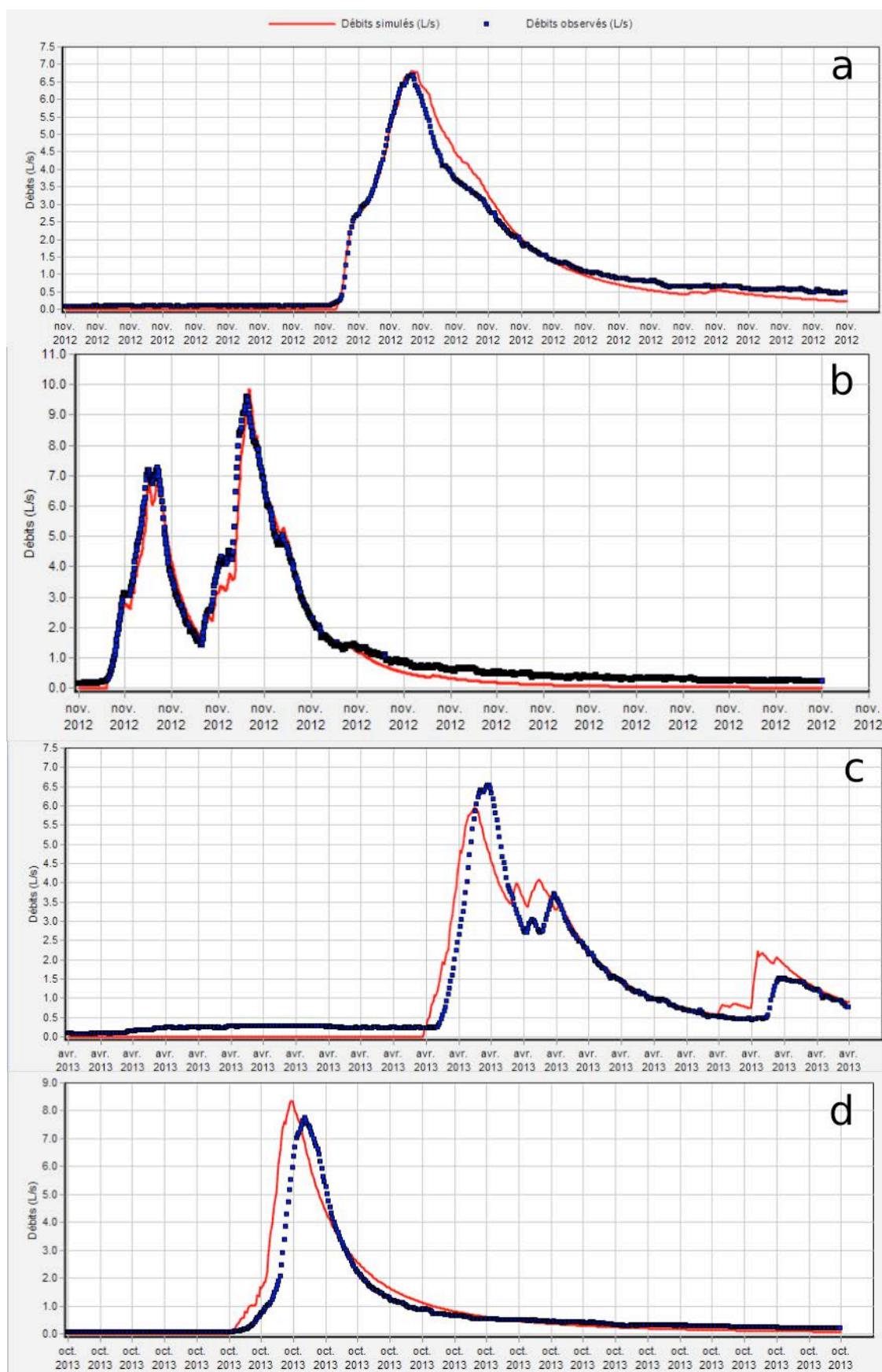


Figure 8 : Résultats du calage pour quatre évènements pluvieux en novembre (a et b), à fin avril (c) et en octobre (d)

Bilan de la simulation avec les pluies de Mirany

Les résultats de calage étant satisfaisants, nous en venons maintenant à illustrer certains aspects pertinents du bilan hydrologique de la toiture végétale. La figure suivante résume de manière succincte les composantes de ce bilan.

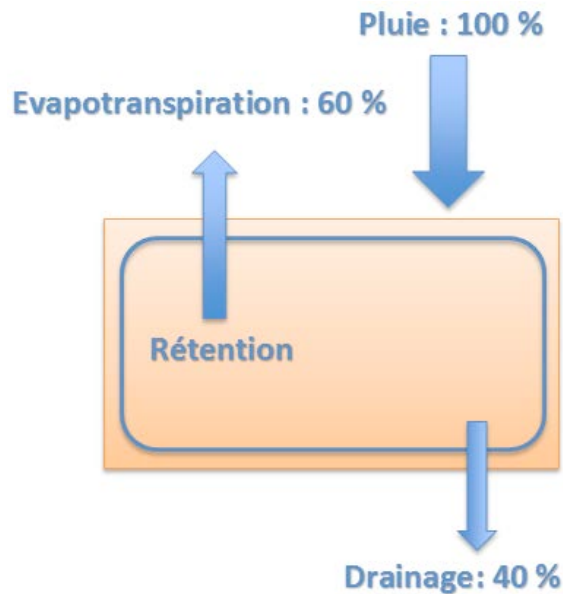


Figure 9. Bilan sur 6 ans de l'efficacité hydrologique de la toiture végétale pour les pluies de Mirany.

4.4 SIMULATIONS AVEC LES PLUIES STOCHASTIQUES

Les paragraphes suivants présentent les résultats de simulations réalisées avec des pluies stochastiques. Les simulations ont été lancées sur une vingtaine d'années. Le même jeu de paramètres utilisé pour la simulation des pluies de Mirany a été repris. Le but étant ici de voir comment se comporte la toiture végétalisée avec des intensités de pluies beaucoup plus importantes et des durées plus longues.

4.4.1 RÉPONSES HYDROLOGIQUES DE LA TV

Le graphique suivant présente le hyétogramme des 20 ans de pluies et l'hydrogramme des débits simulés.

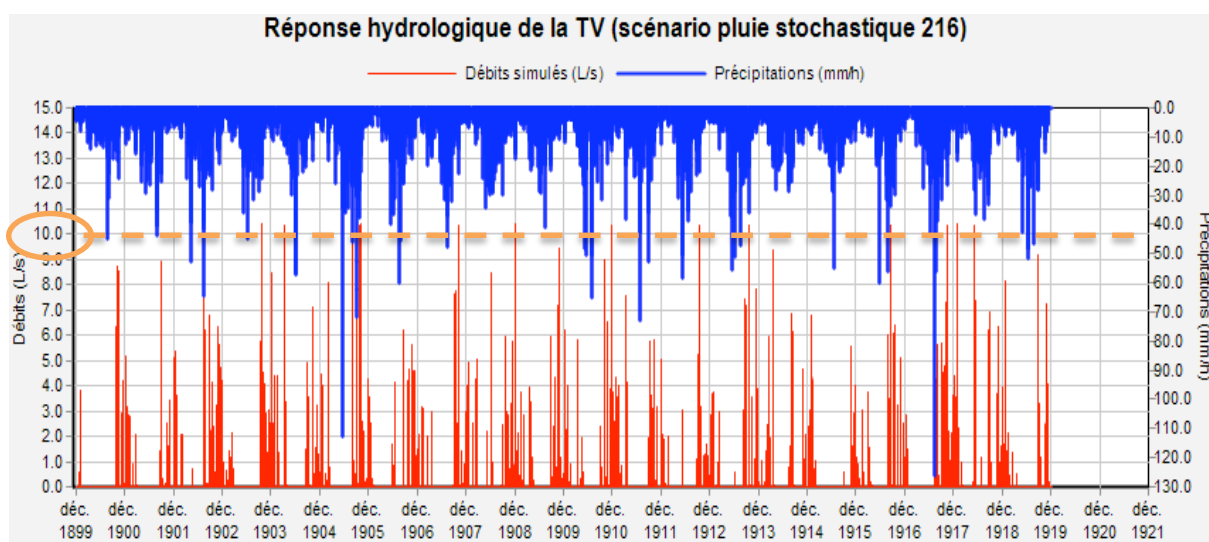


Figure 10. Réponse hydrologique de la TV (scénario pluie stochastique 216) - Epaisseur drain = 50 mm

Les réponses de la toiture végétale les plus importantes sont observées durant les périodes hivernales. Nous remarquons aussi que les pics des débits de ruissellement ne dépassent jamais 10.5 L/s. Ce plafonnement s'explique par une des hypothèses déterminantes du modèle SWMM.

Pour confirmer ce plafonnement, nous avons lancé une simulation en multipliant par deux l'épaisseur de la couche de drainage (soit 100 mm au lieu de 50 mm) et en conservant tous les autres paramètres identiques.

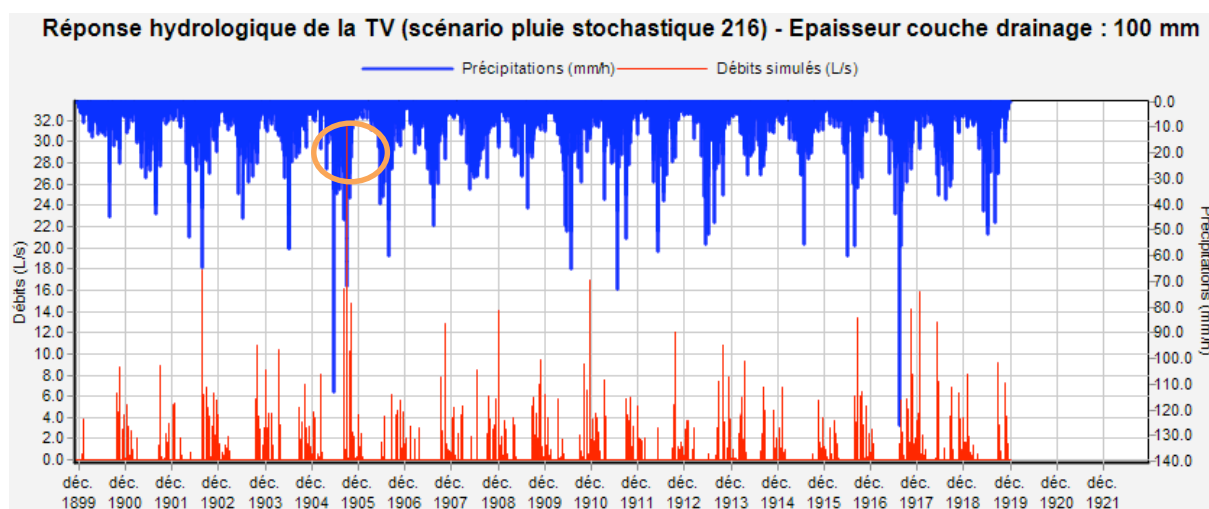


Figure 11. Réponse hydrologique de la TV (scénario pluie stochastique 216) - Epaisseur drain = 100 mm

Nous constatons comme prévu, que le pic de ruissellement atteint les 31 L/s. L'hydrogramme ci-dessus montre que les 10.4 L/s sont dépassés plusieurs fois.

On en déduit l'importance de cette hypothèse lorsqu'il s'agit d'évaluer la capacité de la toiture végétale à limiter l'apport au drain à une quantité maximale imposée.

Le graphique suivant illustre l'évolution en fonction du temps de la teneur en eau du sol (nommé humidité sur le graphique), de l'évapotranspiration, du débit au drain et de la pluie durant une année représentative.

On constate que les teneurs en eau du sol sont très élevées en hiver et très basses en été. Lorsque la teneur en eau du sol dépasse la capacité au champ (42 %), il y a un apport au drain. En été, l'évapotranspiration est la plus forte, elle puise l'eau retenue dans le sol ce qui explique les teneurs en eau faibles, nettement inférieures à la capacité au champ.

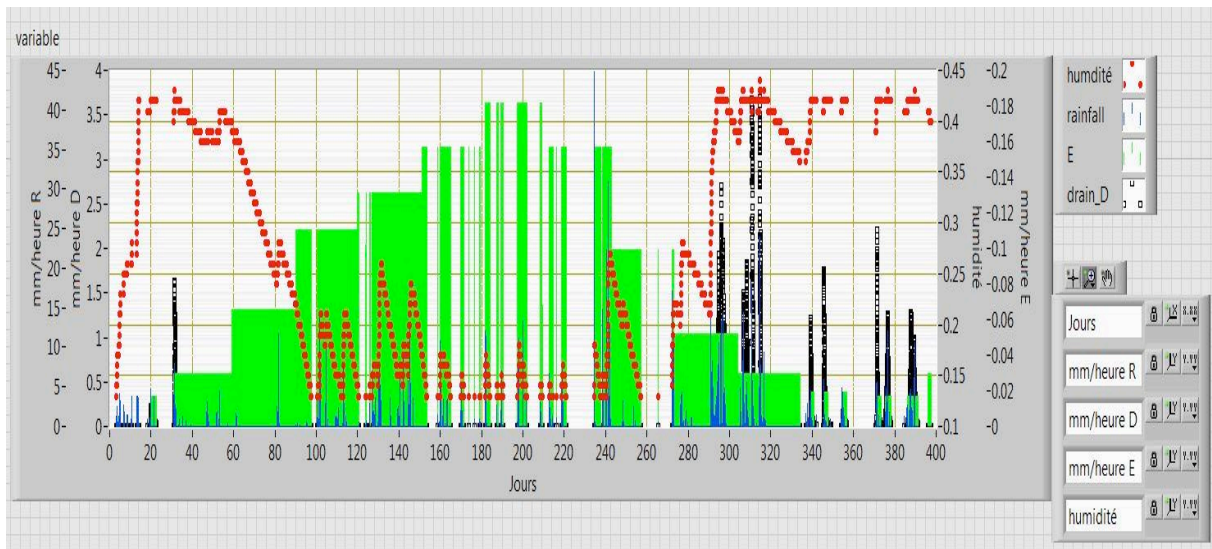


Figure 12. Evolution en fonction du temps de la teneur en eau du sol, de l'évapotranspiration, du débit et de la pluie pour une année représentative.

4.4.2 COMPARAISON AVEC UNE TOITURE DE RÉFÉRENCE

Pour mieux quantifier la réduction des rejets (au drain) d'une toiture végétale, il conviendrait de la comparer avec une toiture non végétalisée dite de référence. Idéalement, il aurait fallu disposer de mesures pluies-débits produites par une toiture conventionnelle. Ces informations faisant défaut, nous avons décidé de comparer la performance de notre toit vert avec celle d'une toiture géométriquement équivalente assimilée à une surface imperméable traditionnelle.

Le toit de référence que nous avons modélisé a les mêmes caractéristiques géométriques que la toiture végétale. Le taux d'imperméabilité est de 100%. Le coefficient de rugosité est égal à 0.03, pour représenter une toiture recouverte de gravier. Les apports calculés à l'exutoire de la toiture de référence devront être comparés aux débits restitués au drain de la toiture végétale.

Les résultats obtenus pour cette toiture conventionnelle sont présentés ci-dessous et doivent être comparés avec ceux de la Figure 10.

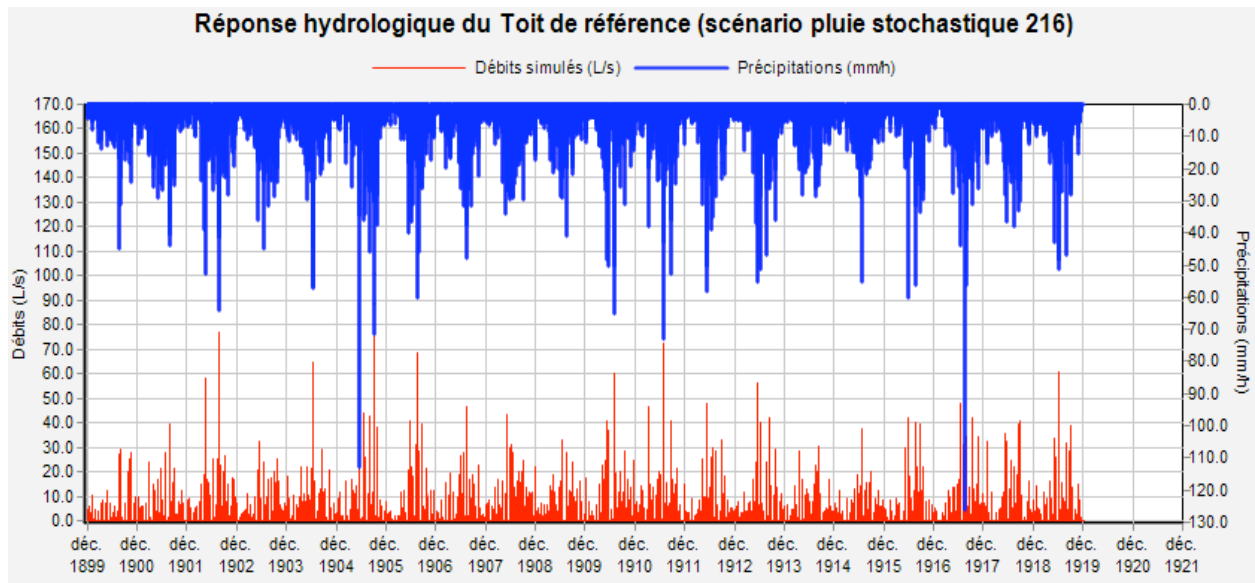


Figure 13. Réponse hydrologique du toit de référence - scénario de pluies stochastiques

On observe qu'il y a des débits restitués au drain durant toute la période de simulation. Il n'existe pas, comme pour le toit vert, de période durant laquelle le débit est très faible. On note également que la majorité des pointes atteignent les 20 L/s, certains pics dépassent même les 70 L/s.

La figure suivante représente schématiquement le bilan des deux toitures analysées.

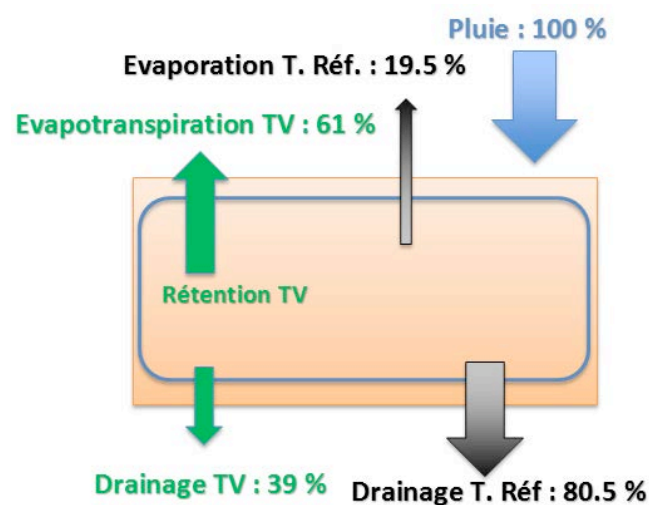


Figure 14. Bilan de l'efficacité hydrologique sur 20 ans de la TV et du toit de référence

Le graphique suivant montre les pointes de débits du toit vert et du toit de référence pour un évènement estival (août). L'évènement pluvial représenté est précédé de 10 jours de sécheresse.

En début d'évènement, lorsque le pic de ruissellement de la toiture de référence avoisine les 35 L/s, la toiture végétalisée ne restitue aucun débit. Plus tard, quand le débit de pointe du toit de référence monte à 24 L/s, le toit vert ne rejette que 6 L/s. Il y a une réduction de 75 % de la pointe de débit en été.

Le pic de ruissellement du toit de référence coïncide tout le temps avec le pic de la pluie car ce toit de référence n'a aucune capacité de rétention. En revanche, le pic de restitution au drain du toit vert est décalé et cette restitution s'étale dans le temps. Ce qui est un indicateur de la capacité de rétention de la toiture.

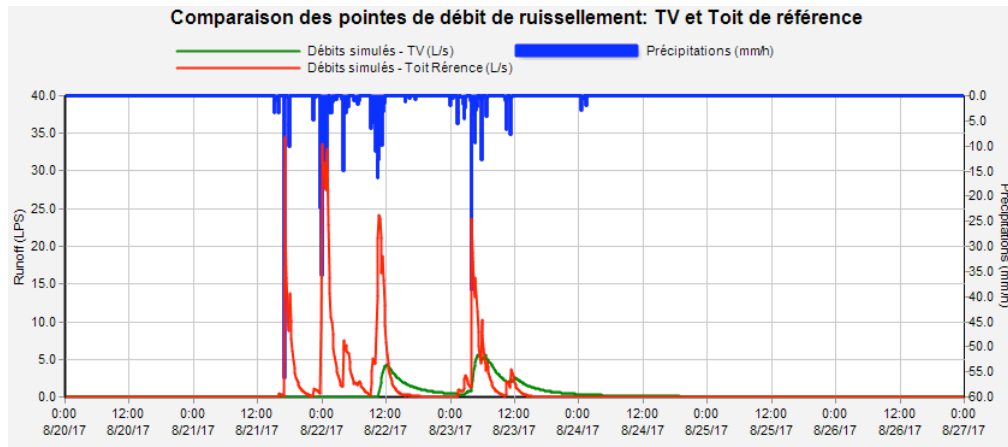


Figure 15. Comparaison des pics de ruissellement de la TV et du toit de référence - Evènement estival

Ce graphique montre les points de débits du toit vert et du toit de référence pour un évènement hivernal.

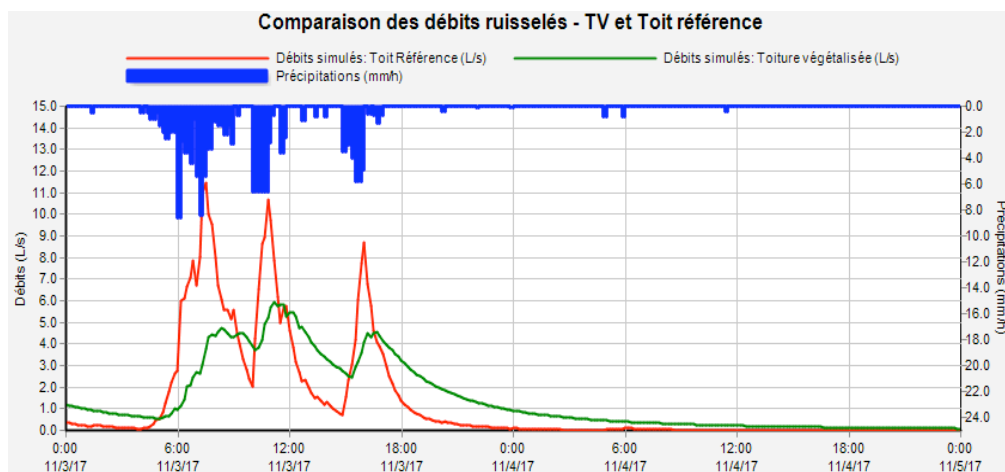


Figure 16. Comparaison des débits de ruissellement de la TV et le toit de référence - Evènement hivernal

Force est de constater qu'en hiver le toit vert affiche une capacité de rétention intéressante mais de moindre efficacité que celle disponible en été. Notez que les intensités maximales de la pluie avoisinent les 8 mm/h. Le débit de pointe de 11.5 L/s de la toiture de référence diminue à 6 L/s pour le toit vert. Il y a une réduction de 48 % de la pointe de débit en hiver.

5. COMPARAISON DE L'EFFICACITÉ HYDROLOGIQUE DE 4 TOITURES VÉGÉTALISÉES EN RÉGION GENEVOISE

L'objectif de cette section est l'analyse des débits mesurés sur trois autres TVs en région genevoise : celle du bâtiment Europe, de la Haute école d'art et de design (HEAD) ainsi que la toiture végétalisée extensive des Hôpitaux universitaires de Genève (HUGext). Ces trois toitures sont de types extensives, contrairement à celle du collège de la Seymaz, qui est de type intensive. Le comportement hydrologique entre ces quatre toitures du printemps à l'automne 2015 est analysé. Les données à disposition sont limitées à cette période, et ne sont pas disponible pour le collège de la Seymaz, c'est pourquoi le modèle hydrologique décrit dans la section précédente est utilisé afin de reproduire le comportement attendu de la toiture. Dans une deuxième partie, le même modèle que celui utilisé pour la Seymaz est paramétré pour les autres toitures, ceci afin de simuler ces toitures et d'évaluer leur comportement hydrologique en termes de laminage des débits et de rejets au drain pour une période plus longue que celle couverte par les données. Ces modèles sont testés par différentes pluies synthétiques de 20 ans reproduisant une dynamique de précipitation conforme à celle observée jusqu'à lors en région genevoise.

5.1 DESCRIPTION DES TOITURES ET DONNÉES À DISPOSITION

Les toitures végétalisées Europe, HEAD et HUGext ont des surfaces de 540, 600 et 1125 m² respectivement, et sont toutes de type extensif, c'est-à-dire composées d'une couche de substrat peu épaisse (moins de 150 mm). Contrairement à la TV du collège de la Seymaz (intensive), ces TVs n'ont pas de couche de drainage sous le substrat, qui repose directement sur un geotextile et un film d'imperméabilité (à confirmer pour HUGext). L'évacuation de l'eau s'effectue essentiellement par des évacuateurs de surface, ce qui implique que le substrat soit saturé (ou du moins que la capacité d'infiltration soit dépassée) avant qu'un écoulement de surface amène le surplus d'eau vers les évacuateurs connectés au drain. Le type de substrat varie en fonction de la toiture, celle de l'Europe étant composé de terre végétale avec un mélange de graviers de pouzzolane, et celle de la HEAD de tuiles concassée (75%), de compost (15%) et de pierre (10%). La composition de la toiture extensive des HUG n'est pas connue des auteurs. Le tableau suivant résume les paramètres pertinents connus pour ces trois toitures :

Tableau 2 : Propriétés physiques mesurés ou estimées des toitures végétalisées

		Europe	HEAD	HUGext
Epaisseur de substrat	[mm]	100	125 (70-180)	100
Porosité	[-]	0.2 ¹	0.43 ²	ND
Capacité au champ	[-]	0.104 ¹	ND	0.28 ¹
Point de flétrissement	[-]	0.03 ³	0.03 ³	0.03 ³

¹ Communication M. Fournier

² Rapport TV HEAD, E. Renaud

³ Valeur typique selon P. Boivin

ND Non déterminé

Les données à disposition sont l'enregistrement continu (pas de temps de 10 min) du débit sur l'un des évacuateurs de chaque toiture, de mi-avril jusqu'à fin septembre 2015 (sauf pour HUGext, fin de l'enregistrement le 12 septembre). Une série de précipitation est également disponible pour cette même période (pas de temps identique aux mesures de débit), mesuré à l'aide d'un pluviomètre situé sur la toiture de l'HEPIA, au centre de Genève. Le débit et la pluviométrie pour la toiture du collège de la Seymaz n'étant pas disponible pour cette même période, les débits calculés avec le modèle décrit dans le rapport intermédiaire « Analyse de l'efficacité hydrologique d'une toiture végétalisée » (Consuegra, N'Gaidé Diouf et Queloz, 2015) ont été utilisés avec la même pluviométrie enregistrée pour les autres toitures.

5.2 COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES TOITURES

La Figure 18 présente la pluviométrie ainsi que les débits spécifiques (en mm/h) observés pour chacune des toitures. On constate que tous les toits répondent aux mêmes évènements de pluie et de manière simultanée, mais avec des intensités différentes. Seul la TV des HUG montre des rejets supplémentaires au milieu de l'été après des pluies relativement conséquentes (25 mm), alors que les autres toitures semblent pouvoir absorber ces précipitations. Sur l'entier de la période observée, la part des précipitations évacuées au drain est respectivement de 0.15, 0.28, 0.38 et 0.45 pour la Seymaz, Europe, HEAD et HUGext. Cette statistique est visible à l'échelle mensuelle sur la Figure 17.

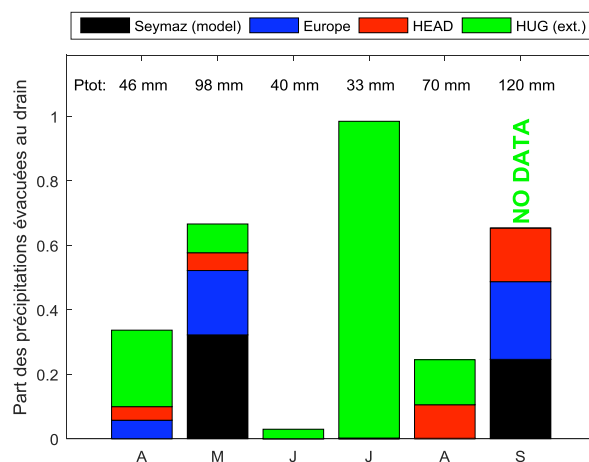


Figure 17 : Part des précipitations évacuées au drain par mois

Malgré la faible épaisseur de la couche de substrat des TVs extensives, elles ont une capacité de rétention suffisante pour contenir les précipitations estivales, même conséquentes (20 mm en 24h par exemple), pour autant que la capacité de rétention puisse être restaurer grâce à l'évapotranspiration (pas de percolation puisqu'il n'y a pas de drainage de fond). Par exemple, lors des deux évènements pluvieux du 23 et 25 juillet qui ont occasionnés des débits pour la TV des HUG, la première précipitation a suffi à saturer le substrat des HUG, mais était insuffisante pour saturer celui de l'Europe, et à fortiori ceux de la HEAD et de la Seymaz. La période de deux jours sans précipitation qui a suivi n'a pas eu d'influence notable sur la teneur en eau du sol du substrat de la HUG (contrairement aux autres TVs) si bien que la toiture a répondu de manière conséquente et rapide à la précipitation du 25 juillet.

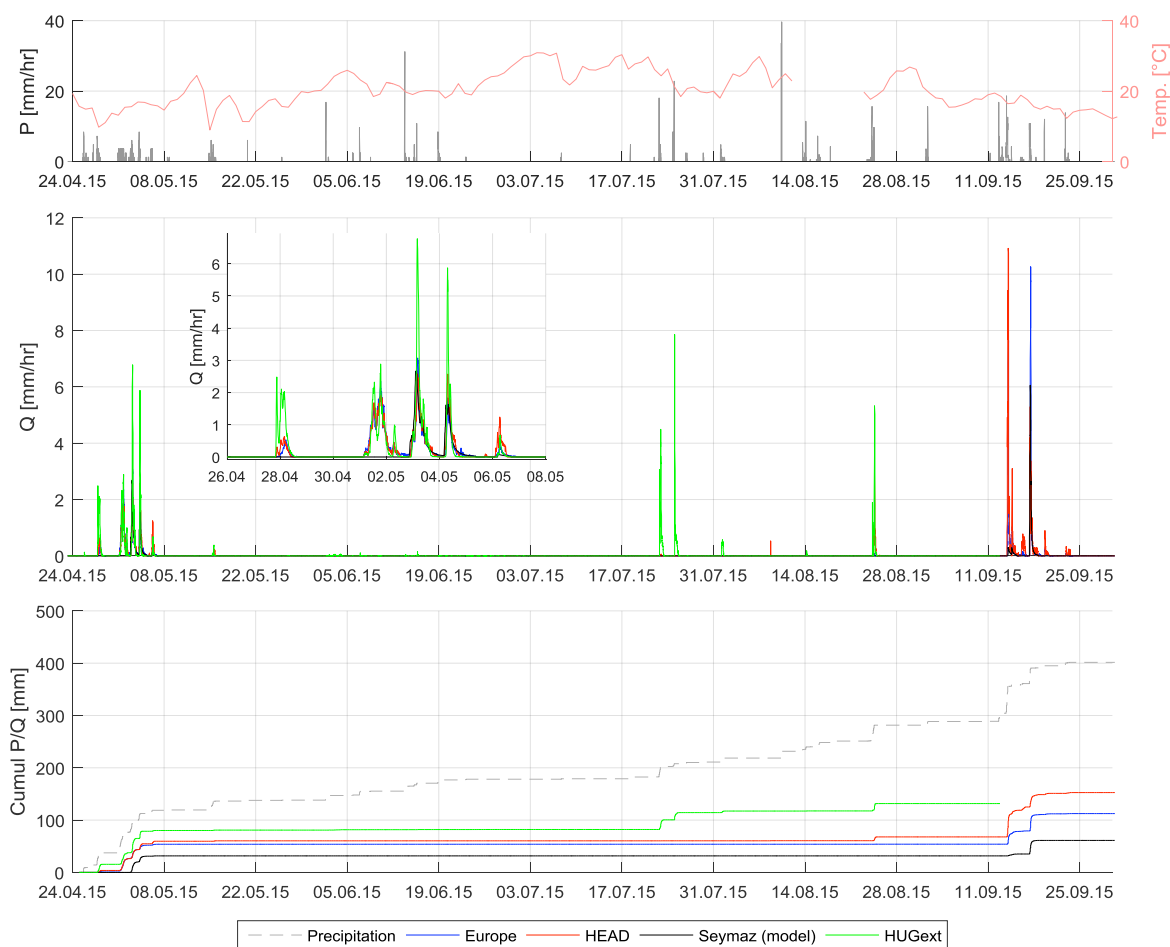


Figure 18: Pluviométrie, température, débits et débits cumulés pour les quatre toitures. Cartouche : zoom sur la période du 25 avril au 8 mai.

La cartouche de la Figure 18 montre que, exception faite de la TV des HUG pour laquelle les débits observés sont systématiquement plus importants, les intensités de débit des différents toits sont similaires une fois que le substrat est saturé en eau, comme c'est le cas pour le troisième et le quatrième pic de débit. Aucun débit n'est observé au préalable dans le cas de la Seymaz, le substrat n'étant pas encore saturé.

5.3 MODÉLISATION DES TOITURES EXTENSIVES

La modélisation des toitures extensives Europe, HEAD et HUG s'est faite par l'intermédiaire du logiciel EPA SWMM (Release 5.1.010), à l'instar du modèle développé pour le collège de la Seymaz, détaillé dans la section précédente. La différence principale de la paramétrisation des modèles des toitures extensives par rapport à la TV extensive de la Seymaz est due à l'absence de zone de drainage sous le substrat, et donc une évacuation des eaux pluviales uniquement par un écoulement à la surface du substrat (ou de la couche de végétation) jusqu'aux évacuateurs. On notera que même si cette étude ne s'intéresse nullement à la qualité de l'eau évacuée, cette différence de configuration entre le type de TV intensif/extensif (du moins pour les exemples traités ici) peut

avoir des conséquences importantes sur la composition chimique des eaux rejetées. L'absence de couche de drainage dans SWMM n'est pas directement possible, mais en définissant une épaisseur très faible de cette couche et/ou en lui attribuant une rugosité importante, on arrive à très fortement limiter le débit sortant, qui devient nul par approximation numérique lors du calcul.

Pour chacune des toitures, la calibration du modèle s'est faite à partir d'un set de paramètres géométriques et physiques initial tiré de mesures, d'estimations et de la littérature. Les paramètres les plus sensibles ont ensuite été identifiés, et les débits modélisés ont été ajustés visuellement sur les débits mesurés par tests successifs (méthode « trial and error ») des paramètres sensibles pertinents. Le tableau suivant résume les paramètres initiaux et calibrés pour chacune des toitures.

Tableau 3 : Récapitulatif des propriétés et des paramètres de calibration des toitures analysées

	Europe		HEAD		HUG (ext.)	
	Val. initiale	Val. calibrée	Val. initiale	Val. calibrée	Val. initiale	Val. calibrée
Surface (m2)	540		650		1125	
Largeur caract. (m)	12		13		25	
Zone de surface						
Hauteur bermes (mm)	100	55	0.5	10	10	0.1
Rugosité (-)	1	1	1.5	2	1.5	0.6
Pente (%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.15
Zone de substrat						
Profondeur (mm)	100	100	125	125	100	100
Porosité (-)	0.2	0.2	0.43	0.2	0.3	0.11
Cap. au champ (-)	0.104	0.104	0.3	0.1	0.28	0.07
Pt. de flétrissement (-)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Cond. hydr. (mm/hr)	10	100	200	200	200	200
Zone de drainage						
Profondeur (mm)	0.1	0.1	0.1	0.001	0.1	0.001
Porosité (-)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Rugosité (-)	0.3	10	0.1	0.1	0.1	0.1

Note: ni la toiture de la HEAD, ni celle de l'Europe n'ont à proprement parlé de hauteur de berme. On considère une valeur > 0 pour permettre une accumulation d'eau en surface.

Paramètres mesurés

Contradiction mesures

On constate que seul le modèle pour la TV de l'Europe repose uniquement sur les paramètres mesurés et estimés, et n'a pas subi d'ajustement conséquent pour obtenir une reproduction adéquate des débits mesurés.

Pour la TV de la HEAD et des HUG, la différence principale entre le set de paramètres calibré et initial est la capacité de rétention réelle du substrat. En effet, selon les mesures et estimations de

la porosité et du point de flétrissement (notons que la capacité au champ est peu sensible pour les toitures extensives puisqu'il n'y a pas de percolation dans la couche drainante, rendant également la conductivité hydraulique très peu sensible), la capacité de rétention théorique est nettement plus importante qu'il n'y paraît après l'ajustement effectué par calibration. Même après une longue période sèche avec une évapotranspiration importante (engendrant une teneur en eau proche du point de flétrissement), le volume de précipitation nécessaire afin d'induire un débit est nettement plus faible que ce que suggèrent les mesures. Cette différence peut également s'expliquer par une épaisseur de substrat réelle plus faible, résultant par exemple d'un tassement de la couche après sa mise en place et sa mesure. Il faut également mentionner que pour le cas de la toiture de la HEAD, l'épaisseur du substrat de 125 mm représente une moyenne, car la couche a en réalité une épaisseur de 70 mm sur les bords, avec la présence d'un monticule au centre jusqu'à 180 mm d'épaisseur. Cette géométrie ne peut être représentée directement de manière adéquate par le modèle utilisé.

Le bilan total de l'écoulement par rapport aux précipitations dépend en majeure partie de la capacité de rétention du substrat, alors que la dynamique des écoulements est fortement liée à la couche de surface (surface du substrat, avec présence de végétation), représenté par une pente de surface, une rugosité, une hauteur de berme et une densité de végétation (peu sensible). La pente de surface n'étant pas forcément représentative de la pente du toit, ce paramètre est utilisé en combinaison avec la rugosité pour ajuster la dynamique des débits simulés avec les débits mesurés. La hauteur des bermes a uniquement une influence notable sur le premier pic d'écoulement après une période sèche. L'écoulement de surface n'a lieu qu'une fois la hauteur des bermes atteintes, ce qui engendre une « perte » ayant lieu juste après que le substrat soit saturé au débit d'un nouvel événement pluvieux. Les débits mesurés et simulés pour les trois toitures sont visibles dans la Figure 19.

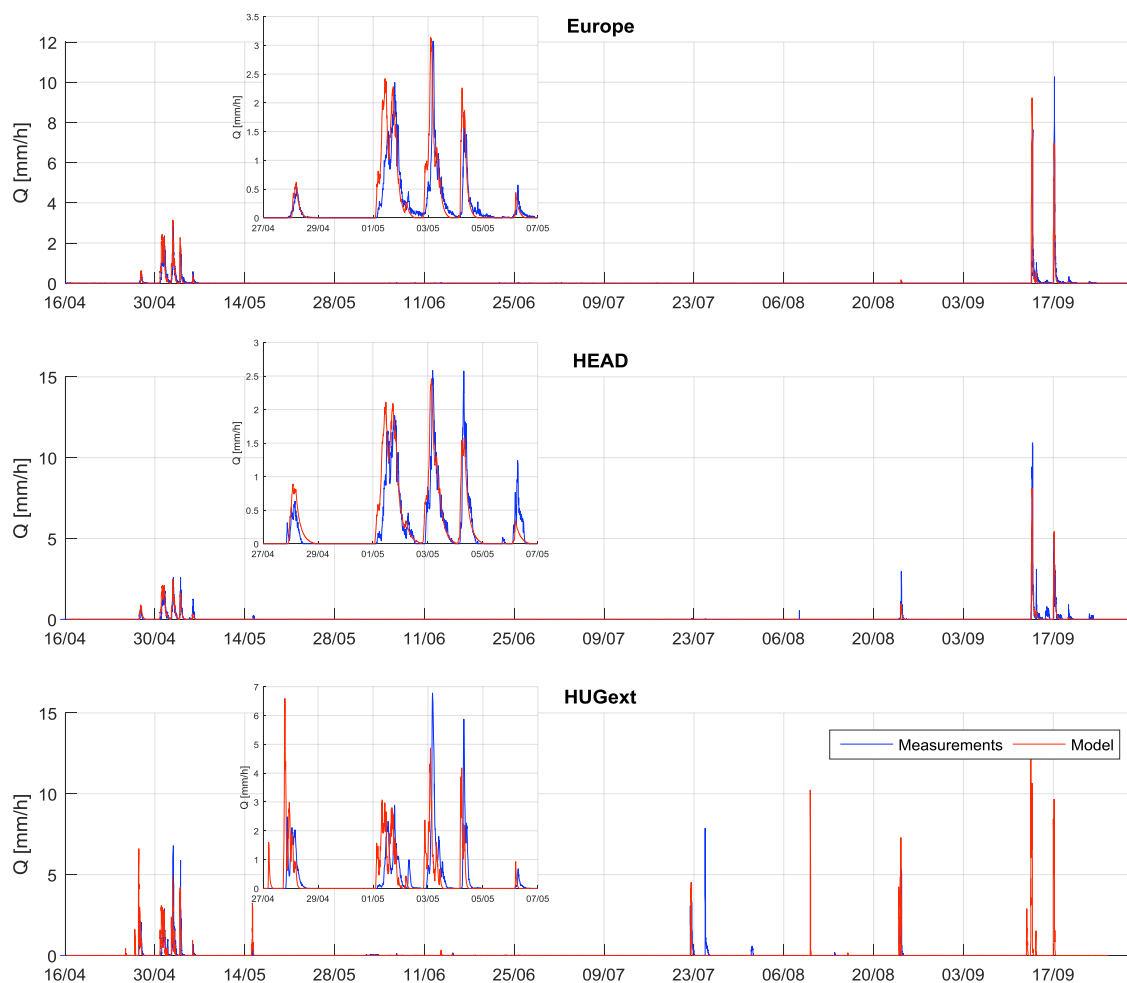


Figure 19 : Débits mesurés et simulés pour les TVs Europe, HEAD et HUG (ext.). Les cartouches montrent un agrandissement de la période avril-mai 2015.

5.4 SIMULATION À LONG TERME AVEC DES PLUIES SYNTHÉTIQUES

Trois séries de précipitations synthétiques d'une durée de 20 ans chacune, représentatives de la région genevoise ont été utilisées pour alimenter les modèles calibrés des quatre toitures. Les trois graphiques de la Figure 20 décrivent la fréquence des débits de pointes calculés pour chaque évènement pluvial selon les trois séries de précipitations (échelle logarithmique en ordonnée). On remarque que le comportement de la toiture du collège de la Seymaz et celle de la HEAD sont similaires, et représentent les meilleurs candidats en terme d'efficacité hydrologique parmi les quatre toitures étudiées. Il est à souligner que contrairement à ce qui a été observé et décrit dans la section précédente lors du calage du modèle pour le toit du collège de la Seymaz, il n'y a pas de plafonnement de débit (autour de 10 L/s) du modèle de la toiture de la Seymaz, puisque des débits jusqu'à près de 70 L/s ont été observés. Ceci est apparemment dû à une correction du modèle SWMM intervenu entre les deux versions utilisées du logiciel (release et 5.1.006 et 5.1.010). Les débits de pointe de la toiture du bâtiment Europe sont sensiblement plus élevés que pour HEAD et Seymaz, même si la part de la précipitation évacuée au drain est plus faible pour la toiture de la

HEAD (coefficients de ruissellement pour la pluie 202 de 0.42, 0.48, 0.50 et 0.65 pour Seymaz, Europe, HEAD et HUGext, respectivement). Les performances de la toiture des HUG sont nettement inférieures, ce qui a déjà pu être constaté par la fréquence et l'intensité des débits mesurés nettement supérieur aux autres toits (Figure 17 et Figure 18). La période de retour d'un débit de pointe de $20 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ est proche d'une année pour les TVs Seymaz, Europe et HEAD, alors qu'elle est de l'ordre de grandeur du mois pour la TV des HUG. D'un point de vue de la modélisation, la différence entre ces toits s'explique par une paramétrisation engendrant un volume de rétention maximal pour la HEAD, suivi par Europe et finalement HUG. La dynamique de l'écoulement est contrôlé par les paramètres de la couche de surface, qui conduisent à un laminage maximal pour la HEAD et minimal pour les HUG également.

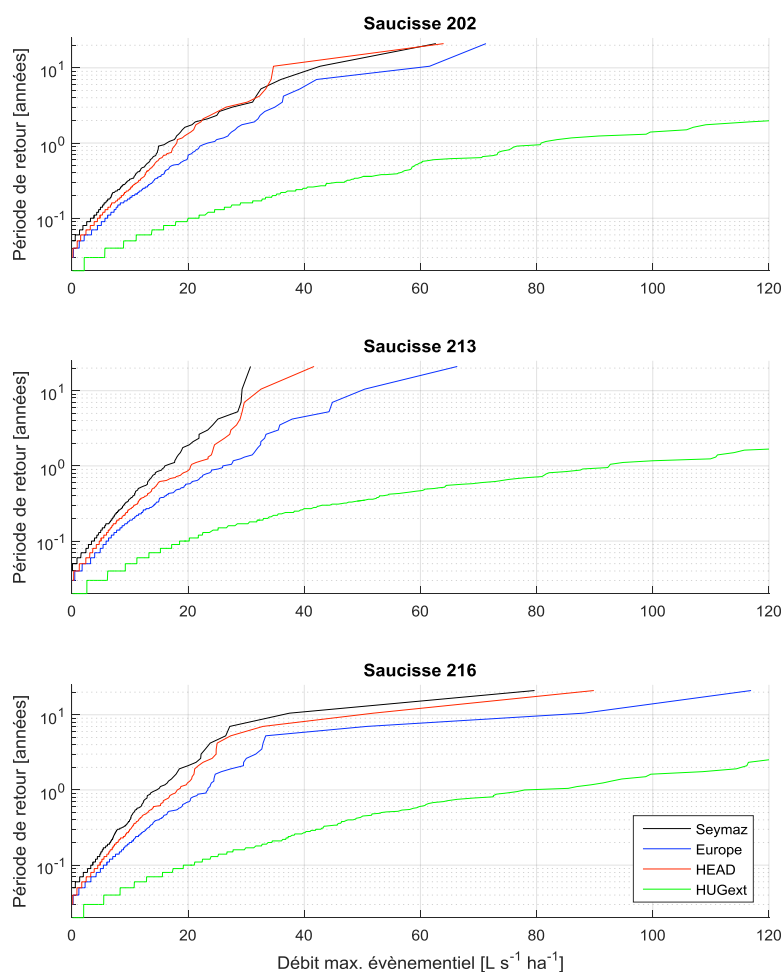


Figure 20 : Analyse statistique des débits de pointes observés sur quatre toitures végétalisées avec trois précipitations synthétiques.

Au vu de la très courte période pour lesquelles des données sont disponibles, la calibration de ces modèles (sauf Seymaz) et l'interprétation des résultats obtenus avec ces pluies stochastiques sont à prendre avec prudence.

6. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Les mesures effectuées sur toutes les toitures végétalisées présentées dans ce rapport montrent clairement que ces ouvrages sont efficaces afin de limiter les débits évacués par rapport aux intensités de pluie reçue. On observe également que l'évapotranspiration représente une part importante du bilan hydrique annuel. Le substrat permet donc de retenir les précipitations, et de les restituer progressivement dans l'atmosphère par évapotranspiration. En hiver, lorsque l'évapotranspiration est très faible, la période entre deux précipitations ne permet en général pas d'évaporer toute l'eau du substrat et de rétablir une capacité de rétention maximale, de telle sorte que la réponse du drain à une précipitation est plus rapide, plus fréquente et plus importante. En été par contre, un débit dans le drain n'est observé qu'occasionnellement que pour un des toits verts étudiés.

Bien que les performances des différents toits ne soient pas radicalement différentes, la meilleure efficacité en termes de limitation de débit est observée pour le toit vert intensif du collège de la Seymaz. Une différence fondamentale en termes de fonctionnement entre le type intensif et extensif des toitures étudiées réside dans le fait que le substrat doit être saturé avant qu'il y ait écoulement sur la surface du substrat puis dans les drains pour les toits verts extensifs, alors que pour la toiture intensive, la présence d'une couche de drainage permet un écoulement sous la couche de substrat. Dans ce dernier cas, la capacité au champ et la conductivité hydraulique de la couche de substrat, ainsi que les paramètres géométriques et d'écoulement (rugosité) dans la couche de drainage définissent la réponse de l'écoulement dans le drain. Pour les toits verts extensifs, seuls la capacité de rétention totale (i.e. l'épaisseur du substrat et la porosité) et les paramètres d'écoulement sur la surface du substrat (rugosité et hauteur de bermes) déterminent le volume de précipitation nécessaire avant qu'un écoulement soit observé ainsi que la dynamique de cet écoulement. On remarque donc que le comportement d'un toit vert extensif (excluant pour les cas d'étude de ce rapport tout écoulement par le fond) est similaire à une toiture piscine, avec un volume de stockage défini et un écoulement activé une fois seulement que la précipitation a dépassé la capacité de stockage. Malheureusement, l'absence de données pour une toiture de référence (sans substrat) n'a pas permis de comparaison directe avec des toitures végétalisées, en particulier quant à la dynamique de l'écoulement une fois la capacité de stockage atteinte et le temps nécessaire afin de rétablir une capacité de stockage maximale par évaporation ou par transpiration.

Dans une optique de dimensionnement d'ouvrage, le paramètre principal à ajuster est la capacité de stockage du substrat, aussi bien pour les toits verts intensifs qu'extensifs. Si la toiture peut être construite afin d'assurer le stockage de la pluie de dimensionnement, le type extensif peut s'avérer suffisant et les propriétés géométriques influençant l'écoulement de surface et la dynamique de l'écoulement dans le drain (rugosité de surface, position des évacuateurs, pente de surface) sont des paramètres relativement peu significatifs puisqu'aucun écoulement ne sera généralement

observé. Toutefois, si on considère une série de précipitations intervenant à des intervalles de temps relativement restreints ou si la capacité de stockage est inférieure à la pluie de dimensionnement, on préfère alors le type intensif avec des évacuateurs dans la couche de drainage qui permettront un écoulement plus progressif et une « vidange » plus rapide de la couche de substrat. Il est finalement à retenir que même si la capacité de stockage est dans une certaine mesure relativement facile à estimer grâce à un ensemble de paramètres géométriques et physiques du sol, ceux qui contrôlent la dynamique de l'écoulement sont difficilement quantifiables sans avoir recours à une calibration de modèle basée sur des mesures d'études de cas.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Aménagement et eaux pluviales sur le territoire du Grand Lyon. Guide pratique.* 2008.
Communauté urbaine de Lyon, direction de l'Eau. Lyon, France.
- Arnaud, P., et J. Lavabre. «La modélisation stochastique des pluies horaires et leurs transformations en débits pour la prédétermination des crues.» *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 2000: 441-462.
- Bennis, Saad. *Hydraulique et hydrologie.* 2009.
- Boucher. «Water and Science.» 2005.
- Burszta-Adamiak, E., et M. Mrowiec. «Modelling of green roofs's hydrologic performance using EPA's SWMM.» *Water Science and Technology*, 2013.
- Carbone, M., G. Garofalo, G. Nigro, et P. Piro. «A conceptual model for predicting hydraulic behaviour of a green roof.» *Procedia Engineering*, 2014.
- Consuegra, David. «La question des débits de dimensionnement.» 2013.
- Cottier, R. *Hydrologie de base pour l'ingénieur.* 2012.
- Diouf, Fatimétou N'Gaïdé. «Analyse de l'efficacité hydrologique d'une toiture végétalisée.» 2015.
- Douglas, Ellen M., Jennifer M. Jacobs, David M. Sumner, et Ram L. Ray. «A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for florida land cover types.» *Journal of Hydrology* 373, n° 3-4 (July 2009): 366-376.
- Etat de Genève. *Gestion des eaux non polluées. Méthodes simplifiées pour le dimensionnement et la conception des ouvrages de rétention.* Genève, 2004.
- Stovin, Virginia, Nigel Dunnett et Adrian Hallam. «Green roofs - getting sustainable drainage off the ground.» 2007. Novatec'2007
- Johnston, Chris, et Kathryn Mc Creary. «Vancouver Public Library green roof monitoring project.» *Public works and Government Services Canada*, 2006.
- Kasmin, H. «Towards a Generic rainfall -runoff model for green roofs with HYDRUS 1D.» *Journal of Hydrology* , 2010: 358.
- Lamera, C., G. Becciu, M.C. Rulli, et R. Rosso. «Green roofs effects on the urban water cycle components.» *Procedia Engineering*, 2013.
- Lawlor. «Water and Science.» 2006.
- Locatelli, Luca, Ole Mark, Peter S. Mikkelsen, Karsten Arnbjerg-Nielsen, Marina B. Jensen, et Philip J. Binning. «Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications.» *Journal of Hydrology*, 2014.

- Mahoney, Joanne M. Onondaga County's green infrastructure program. 2013. Eastside TNT Meeting 2013.
- Marasco, Daniel E., Patricia J. Culligan, et Wade R. McGillis. «Evaluation of common evapotranspiration models based on measurements from two extensive green roofs in New York City.» *Ecological Engineering* 84 (2015): 451-462.
- Mentens, J., et D. Raes. «Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century.» *Landscape and Urban Planning* , 2006: 77, 217-226.
- Mermoud, André. *Dynamique de l'eau du sol*. 2006.
- Mermoud, André. *L'évaporation et l'interception*. Lausanne, Lausanne, 2009.
- Musy, Andre. *Evaporation et Interception*. Genève, Genève, 2009.
- Musy, André, et C. Higy. *Hydrologie appliquée*. 1999.
- Musy, André, et Marc Soutter. *Physique du sol*. 1991.
- Ollier, et Poirée. «L'eau dans le sol.» 1981.
- Oudin, Ludovic, et al. «Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling.» *Journal of Hydrology*, n° 303 (2005): 290-306.
- Rivard, Gilles. *Gestion des eaux pluviales en milieu urbain: Concepts et applications*. 2005.
- Roy. «Water and Science.» 2006.
- She, Nian, et Joseph Pang. «Physically Based Green Roof Model.» *Journal of hydrologic engineering* 15, n° 6 (2010): 458-464.
- Stovin , Virginia, Simon Poë, et Christian Berreta. «A modelling study of long term green roof retention performance.» *Journal of Environmental Management*, 2013.
- Vertessy R.A, et H. Elsenbeer. «Distributed modeling of storm generation in an Amazonian rain forest catchment: effects of model parametrisation.» *Water Resources Research*, 1999: 35, 2173-2187.
- Vesuviano, Gianni, et Virginia Stovin. «A Generic Hydrological Model for a Green Roof Drainage Layer.» *Water Science & Technology* 68, n° 4 (2013): 769-775.
- Vesuviano, Gianni, Fred Sonnenwald, et Virginia Stovin. «A two-stage storage routing model for green roof runoff detention.» *Water Science and Technology*, 2013.
- Woert, Van. *Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope and Media Depth*. 2005.

Impact des toitures végétalisées sur la qualité thermique des bâtiments et le microclimat local dans le canton de Genève

RAPPORT FINAL PROJET TVEG 2014-2016



Genève, le 19 février 2016

Auteurs :

Damien Varesano, assistant de recherche

Sylvie Margot, assistante de recherche

Victor Guillot, assistant HES

Peter Gallinelli, chargé d'enseignement HES

Reto Camponovo, professeur HES, responsable LEEA

LEEA // hepia

Laboratoire Energie Environnement Architecture

4 rue de la Prairie
1202 Genève

Tél. +41 (0)22 546 2863

E-mail: damien.varesano@hesge.ch

RÉSUMÉ

Cette étude propose d'évaluer l'impact des toitures végétalisées sur la qualité thermique des bâtiments afin d'apporter des connaissances complémentaires sur la thématique dans un contexte genevois. Les mesures in-situ de flux thermiques et de températures effectuées sur une toiture végétalisée extensive - 10 cm de couche végétale et déjà bien isolée - indiquent que son coefficient de transmission thermique U est très proche de la même toiture recouverte simplement d'une couche de gravier rond. La capacité des toitures végétalisées à réduire les déperditions thermiques en hiver ne semble donc pas une hypothèse généralisable. Concernant leur capacité à améliorer le confort thermique estival à l'intérieure des bâtiments, les mesures ne permettent pas de se prononcer concrètement sur l'impact du substrat sur le climat intérieur. Un albédomètre - composé de deux pyranomètres - a mesuré en continu l'albédo du couvert végétal sur une période de plusieurs mois à l'été 2015. Les résultats montrent que les valeurs varient entre 0.12 et 0.24 sur la période de mesure pour une moyenne de 0.19. La capacité de cette surface à absorber la chaleur par rayonnement n'est donc pas négligeable. Concernant l'impact sur le micro climat local, les résultats de mesure de la température de l'air au niveau de plusieurs points stratégiques montrent que, dans le contexte des fortes températures estivales de 2015 et d'un substrat pauvre en eau, les effets de la toiture végétalisée extensive étudiée sur la réduction des températures de l'air sont absents. Dans les conditions de l'expérience, il semble que la capacité en termes d'évapotranspiration et de réduction du flux de chaleur sensible de la toiture extensive étudiée soit en effet très limitée sur cette période sèche.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	2
NOMENCLATURE	4
CONTEXTE DE L'ÉTUDE	7
PARTIE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES TOITURES VÉGÉTALISÉES ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL	8
PARTIE 2 : TRAVAIL DE RECHERCHE APPLIQUÉE À GENÈVE	18
2.1. Toitures à l'étude	18
2.2. Généralités sur les expériences et la présentation des résultats	21
2.3. Expériences et résultats	22
2.3.1. Albédométrie	22
2.3.1.1. Expérience et protocole	22
2.3.1.2. Résultat : albédo de la surface végétalisée	23
2.3.2. Mesure des flux thermiques et des températures afférentes	26
2.3.2.1. Expérience et protocole	26
FLUXMÉTRIE	26
HIVER : MESURE DES TEMPÉRATURES DES COUCHES SUPERFICIELLES EXTÉRIEURES	26
ÉTÉ : MESURE DES TEMPÉRATURES DES COUCHES SUPERFICIELLES EXTÉRIEURES	28
2.3.2.2. Résultats	29
HIVER	29
ÉTÉ	38
2.3.3. Mesure de température de l'air ambiant	40
2.3.3.1. Expérience et protocole	40
2.3.3.2. Profils verticales de températures comparées	41
PARTIE 3 : CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS	43
Hiver et déperditions thermiques	43
Confort estival dans les bâtiments	43
Ilôt de chaleur urbain	43
BIBLIOGRAPHIE	45

NOMENCLATURE

- | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| • mètre (m) | • mètre cube (m ³) | • Joule (J) |
| • centimètre (cm) | • kilogramme (kg) | • Degrés Celsius (°C) |
| • mètre carré (m ²) | • Watt (W) | • Kelvin (K) |

Termes généraux

- Toiture végétalisée (TV) = élément de construction horizontal qui consiste à mettre en œuvre une couche végétale dans la partie supérieure de l'élément, couche ayant pour but d'accueillir de la végétation. [1]
- Végétalisation extensive = végétalisation ne nécessitant qu'une couche végétale mince (épaisseur 80 à 200 mm). Les végétaux qui conviennent sont les mousses, plantes grasses, herbacées et graminées, adaptées aux conditions extrêmes de l'emplacement et qui ont une grande capacité de régénération. [1]
- TV intensive = végétalisation nécessitant une couche végétale d'épaisseur moyenne à forte – de 120 à 500 mm, qui reçoit des végétaux bas à moyennement élevés et permettant la plantation de plantes vivaces et d'arbres. [1]
- Toiture standard 1 (TS-1) = Toiture recouverte d'une couche de gravier rond.
- Toiture standard 2 (TS-2) = Toiture recouverte d'une couche d'étanchéité bitumineuse.
- Ilot de chaleur urbain (ICU) = augmentation des températures en milieu urbain par rapport à sa périphérie.
- Substrat = Matériau produit industriellement, constitué de plusieurs composants mélangés, utilisé comme couche végétal [1].
- Sol = Couche de terre meuble dans laquelle peuvent pousser les végétaux ; elle comporte une partie supérieure et une partie inférieure.
- Géotextile = Natte filtrante empêchant les particules fines provenant de la couche végétale d'atteindre la couche située en dessous et protégeant l'étanchéité contre la perforation par les racines. [1]
- Etanchéité à l'eau = Couche protégeant la structure du bâtiment des infiltrations d'eau provenant de l'extérieur. [1]
- Couche drainante = Couche généralement situé sous le géotextile et au-dessus de l'étanchéité. Elle offre un espace pour drainer l'eau vers les évacuations de la toiture. [1]
- Evapotranspiration (ET) = Phénomène combiné de perte en eau par transpiration et par évaporation directe de l'eau du sol et des surfaces d'eau libre. Il correspond au phénomène physique du passage de l'eau du sol et des surfaces d'eau libre. [2]
- Formule de Penman-Monteih (PM-FAO) = Formule permettant le calcul de l'ET potentielle théorique (ET_p) d'un couvert végétal. Elle a l'avantage de considérer tous les paramètres qui règlent la balance énergétique du sol à l'atmosphère en passant par la végétation. [2] L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) considère cette méthode comme la référence mondiale pour le calcul de l'ET de référence d'une surface végétalisée. [21]
- Photosynthèse (PS) = Pour les plantes, processus de synthèse de la matière organique par absorption d'énergie lumineuse et transformation d'eau. [2]
- Surface foliaire = Division de l'espace occupée par les feuilles au-dessus de la couche végétale. [1]

Transmission et échanges de chaleur

- Coefficient de transmission thermique (U) en $W/(m^2.K)$ = Flux de chaleur qui s'écoule, à l'état stationnaire, à travers une section de 1 m² d'un élément de construction, perpendiculairement à sa surface et lorsqu'une différence de température de 1 K est maintenue entre ses deux faces. Plus il est faible, plus le pouvoir isolant de l'élément est meilleur. [19]
- Conductivité thermique (Lambda) en $W/(m.K)$ = Quantité de chaleur qui se propage par conduction thermique à travers une section de 1m², sur une épaisseur de 1m et pour un gradient de 1 kelvin dans le matériau. [19]
- Résistance superficielle extérieure (Rse) en $(m^2.K)/W$ = Quantité de chaleur échangé par convection et par rayonnement entre la face extérieure d'un élément et l'air ambiant. [19]
- Capacité thermique en J/K = Quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température d'un matériau. [19]
- Chaleur massique (c) en $J/(kg.K)$ = Capacité thermique rapportée à la masse du matériau. [19]
- Diffusivité thermique en m²/s = Rapidité à laquelle une perturbation de la température se propage dans un matériau. Plus elle est faible, plus [19]
- Effusivité thermique en $J/(m^2.K.s^{0.5})^{-1}$ = Capacité d'accumulation de chaleur d'un matériau de construction homogène et d'épaisseur semi-infinie. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie sans se réchauffer notablement. [19]
- Déphasage thermique = Dans le domaine du bâtiment, le décalage temporel entre l'apparition des valeurs extrêmes de température à l'extérieur et à l'intérieur est décrit comme déphasage thermique. [19]
- Chaleur sensible = Chaleur échangée entre différents corps sans transition de phases. [19]
- Chaleur latente de vaporisation de l'eau (L) = $2.45 \cdot 10^6$ J/kg = Quantité d'énergie nécessaire pour évaporer 1 kg d'eau.

Rayonnement

- Rayonnement solaire incident (SWin) en W/m² = Rayonnement global reçu par une surface horizontale dans le domaine des courtes longueurs d'ondes. [2]
- Rayonnement solaire réfléchi (SWout) en W/m² = Rayonnement global d'origine solaire réfléchi par une surface horizontale dans le domaine des courtes longueurs d'ondes. [2]
- Albedo (a) sans unité = Fraction du rayonnement global d'origine solaire (rayonnement direct et diffus) qui est réfléchi par une surface horizontale dans un hémisphère ; autrement dit elle correspond au quotient de SWin sur SWout. [2]
- Pouvoir émissif (ou exitance énergétique) (Me) en W/m² = Puissance rayonnée par unité de surface et dans un hémisphère valable pour l'ensemble du spectre de rayonnement électromagnétique. [2]
- Emissivité spectrale (e) sans unité = Propriété caractéristique d'un matériau donné conditionnant son pouvoir émissif ; autrement dit il est important de connaître l'émissivité d'un corps pour estimer le rayonnement qu'il émet – exitance énergétiques, en fonction de sa température. [2]

Instruments de mesure

- Pyranomètre – Hukseflux NR01 = Mesure le rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale dans un angle solide de 2π stéradian et dans le domaine spectral des courtes longueurs d'ondes (0.3 à 3 micromètres).
- Fluxmètre – Hukseflux HFP01 = Capteur donnant un signal électrique qui est fonction directe du flux thermique qui le traverse.
- Thermocouple – Type K = Capteur donnant un signal électrique qui est fonction de leur température.
- *Datalogger*- Campbell scientific CR800/1000 = Enregistreur de données programmable sur lequel viens se connecter des sondes.
- Sonde Rotronic Hygroclip2 HC2-S(3) = mesure la température et l'humidité relative de l'air.
- Sonde Rotronic PT-100 = mesure la température basé sur le principe de la variation de la résistance électrique.
- Boitier Rotronic Log-HC2 = Enregistreur de données programmable sur lequel vient se connecter les sondes Rotronic.

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Dans le contexte de changement climatique global, des phénomènes d'îlots de chaleur et d'accroissement du nombre d'événements climatiques extrêmes ont été constatés depuis plusieurs années et inquiètent les planificateurs et les habitants des villes. La problématique est identifiable à l'échelle du climat urbain et également à l'intérieur des bâtiments où les températures peuvent atteindre des valeurs élevées créant de l'inconfort et/ou obligeant les concepteurs à recourir à des solutions techniques actives, peu rationnelles au niveau énergétique et qui ne font qu'aggraver la situation.

Dans la perspective de mettre en place des mesures de mitigation, de plus en plus d'études sont réalisées afin de bien comprendre et objectiver l'effet de la végétalisation des infrastructures et la protection des espaces verts sur l'acclimatation et l'adaptation des habitants.

Au niveau du Canton de Genève, qui compte une des plus grandes villes de Suisse, l'impact des toitures végétalisées sur le climat, sur l'hydrologie urbaine et sur la biodiversité, n'a pas encore fait l'objet d'évaluations. Afin d'apporter des connaissances et de comprendre dans quelle mesure et comment ces toitures végétalisées doivent s'intégrer dans le développement territorial, un projet a été initié en 2014 par une équipe de chercheurs de la haute école du paysage d'ingénierie et d'architecture – hepia, de Genève.

Le projet TVeg consiste en une étude de recherche appliquée multidisciplinaire. En tant que partie prenante, l'équipe du Laboratoire Energie Environnement et Architecture – LEEA hepia, se propose d'évaluer l'impact des toitures végétalisées sur le micro climat urbain et sur la qualité thermique des bâtiments. Ce rapport rend compte du travail qui a été mené. Il est structuré en plusieurs parties. Une première consiste en une revue de l'état de l'art sur la thématique des toitures végétalisées et ses impacts du point de vue thermique, énergétique et climatique. La seconde - Travail de recherche appliquée à Genève, présente les expériences in situ et les résultats concernant les objets étudiés localement à l'échelle du canton de Genève. Enfin, la troisième et dernière partie consiste en une conclusion et propose des recommandations et des ouvertures.

PARTIE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES TOITURES VÉGÉTALISÉES ET HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

Les toitures végétalisées (TV) sont des éléments de construction horizontaux qui consistent à mettre en œuvre un substrat dans la partie supérieure de la toiture plate. Cette couche plus ou moins végétale a pour but d'accueillir de la végétation. La norme *SIA 312:2013 Végétalisation de toiture [1]* est la référence actuelle en Suisse. Elle explique les principes de conception et de mise en œuvre d'une TV, détaille les couches nécessaires à la végétalisation des toitures et fournit des informations concernant le choix des matériaux et des végétaux. De façon générale, une TV se compose de 4 éléments principaux comme représenté sur la Figure 1 et qui ont des fonctions bien définies - de l'intérieur vers l'extérieur : une couche d'étanchéité*, une couche de drainage*, une couche de substrat* et une couche de végétation*.

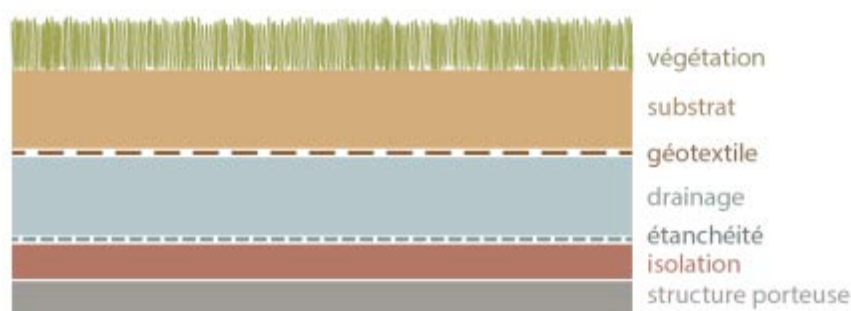


Figure 1 : Composants d'une toiture végétalisée classique.

Partant de ce standard, il existe ensuite de nombreux types de TV et de variante. Elles se différencient par l'épaisseur et le type de substrat mis en œuvre, par son ensemencement* de départ et par le type de végétation que l'on y trouve : on distingue généralement les TV extensive* et intensive* pour respectivement les toitures qui ne nécessitent qu'une couche végétale mince – de 80 à 200 mm, contre des épaisseurs moyennes à élevées – de 120 à 500 mm, pouvant donc accueillir des végétaux de plus grandes hauteurs comme des plantes vivaces ou des arbres. De façon plus générale, les toitures plates se différencient également par la nature de la structure porteuse, la position et le niveau d'isolation et la situation de la couche d'étanchéité. La toiture est dite froide* lorsque l'isolation est située à l'intérieur par rapport à la structure porteuse et chaude* dans le cas inverse. Dans cette disposition, l'étanchéité peut se situer en dessous de l'isolation ; on parle alors de toiture inversée*.

Comparativement à d'autres types de toiture plates tels que les toitures recouvertes de gravier rond (toiture standard 1 - TS-1) ou simplement d'une couche d'étanchéité bitumineuse (TS-2), les TV sont généralement présentées dans la littérature comme des éléments ayant des effets directs et indirects plutôt positifs. Plus particulièrement et pour le volet qui nous intéresse ici, elles permettraient d'une part d'améliorer les performances thermiques des bâtiments en hiver et en été, et d'autre part de limiter la formation des îlots de chaleur urbain (ICU), c'est-à-dire le différentiel de température entre le milieu urbain et sa campagne environnante.

Le rôle de la végétation sur la régulation des écosystèmes climatiques est une thématique bien connue qui est notamment traité dans une approche globale au sein d'ouvrage tel que *Climatologie de l'environnement* de Gérard Guyot [2]. Dans ce livre, l'auteur détaille les échanges énergétiques de l'échelle planétaire, à l'échelle de la plante et les mécanismes complexes qui interviennent dans la formation des climats. L'approche pédagogique de cet ouvrage permet une compréhension générale des phénomènes en jeu et fournit une base

de réflexion essentielle pour comprendre et analyser des objets et des contextes particuliers à l'image des TV dans un environnement et un climat urbain spécifique. Il traduit également la complexité des mécanismes mis en jeu et la multiplicité des facteurs influençant le climat.

A une autre échelle de travail, de nombreuses études scientifiques sont menées sur la thématique particulière des TV dans différents contextes et depuis plusieurs années. Elles ont conduit à de nombreuses publications qui présentent des résultats d'expériences in-situ sur des TV extensive ou intensive, pour plusieurs types de végétation et dans différents contextes climatiques. Certaines se penchent sur les effets des TV vis-à-vis des performances thermiques et énergétiques des bâtiments alors que d'autres se concentrent davantage sur l'échelle du microclimat urbain et sur l'influence des TV sur l'ICU. On trouve également dans la littérature des ouvrages qui adoptent une approche holistique et qui réunissent les connaissances actuelles sur la thématique proposant ainsi une vision large des rôles physiques de la végétation. C'est le cas par exemple de l'ouvrage *La nature en ville* [3], dans lequel Marjory Musy propose un état de l'art pluridisciplinaire et systémique de l'influence du végétal urbain sur les enjeux du développement durable. Les chapitres relatifs aux impacts respectivement sur le microclimat urbain et sur la consommation énergétique et le confort dans les bâtiments font références à de nombreuses publications, détaillent les approches expérimentales et numériques et offre donc une base de réflexion complète et moderne sur la thématique spécifique qui nous intéresse. De plus, ses analyses sont nuancées et tempèrent certaines conclusions aujourd'hui bien établies dans les consciences collectives.

La presse de tous les niveaux s'est également intéressée à la thématique des TV par une vulgarisation des conclusions des études, participant ainsi à la diffusion d'un message essentiellement positif concernant les TV auprès d'un plus large public que la simple communauté scientifique. A une autre échelle encore, ceux sont les entreprises de construction de TV qui utilisent les conclusions comme arguments marketing et qui ventent notamment les effets de synergie entre les TV et le rendement des panneaux solaires photovoltaïques. On peut toutefois s'interroger sur la valeur de ces annonces, qui généralisent entre autre les conclusions d'études scientifiques indépendamment du contexte et de la situation.

Les paragraphes suivants passent en revue et détaillent les connaissances actuelles concernant les TV. Les informations sont extraites de différentes sources et sont organisées selon trois axes qui constituent les trois hypothèses prises en compte tout au long du travail de recherche appliquée qui a été menée.

En hiver, les toitures végétalisées permettent de limiter les déperditions thermiques grâce à des performances thermiques accrues.

Il est fréquent de lire que les TV permettent d'améliorer les performances thermiques des bâtiments. En ajoutant une couche à la structure de la toiture, on apporte d'avantage de résistance thermique* (R) et on renforce l'isolation thermique de l'élément de construction. C'est la conductivité thermique* (λ) du substrat végétalisé et son épaisseur qui devrait notamment conditionner cette amélioration. La composition des substrats varie généralement d'une toiture à une autre – terre végétale, cailloux, briques, sables, limons, pouzzolane, etc. Dans *Sols caillouteux et production végétale* [4], Raymond Gras présente les méthodes de calcul des caractéristiques thermiques des sols caillouteux composés à la fois de terres fines plus ou moins humides et de cailloux. Les informations extraites – voir tableau 1, indiquent les caractéristiques thermiques de chacun des composants mais l'ouvrage ne fournit pas de valeurs pour des sols qui réunissent les deux. Contrairement à la chaleur spécifique, Raymond Gras explique que la conductivité thermique du matériau composite ne peut pas être calculée simplement à partir des λ de chaque composant et peut également fortement varier dans le temps en fonction de sa teneur en eau. Le but n'est pas ici de détailler ces méthodes

mais plutôt de définir si possible un ordre de grandeur pour la conductivité thermique des substrats présents sur les TV. A l'échelle européenne par exemple, les normes [5] stipulent qu'une « résistance thermique additionnelle pour les toits verts tient compte d'une valeur par défaut de 2 W/(mK) en ce qui concerne la conductivité thermique de la terre ». Toutefois, au regard de la diversité des TV et des substrats végétalisés, il semble de toute évidence délicat de donner un lambda précis et surtout unique pour ce matériau et il semble plus pertinent de définir une plage de variabilité de 0.2 à 2 W/(mK).

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques de différents matériaux.

Nature	Conductivité thermique W/(m.K)	Chaleur massique J/(Kg.K)	Masse volumique Kg/m3	Capacité thermique J/K (*10 ⁻⁶)	Diffusivité thermique* m ² /s (*10 ⁻⁶)	Effusivité thermique* J/(m2.K.s ^{0.5})-1
TERRES FINES						
Sable sec (a)	0.57					
Limon calcaire sec (a)	0.33					
Argile (a)	0.58					
Terre sèche (b)					0.5	
Terre sableuse (c) travaillée, humidité 12.5%	0.71			1.29	0.55	
Terre sableuse (c) non travaillée h. 17.5%	1.42			1.83	0.775	
Limon sableux (d) sec	2.5			1.17	0.21	
Limon sableux (d) saturé en eau	25			2.80	0.92	
Argile (e) non saturé en eau	0.25			1.25	0.20	
Argile (e) saturé en eau à 40%	0.16			2.92	0.54	
ROCHES						
Grès (quartzite) (f)	4.40			2.84	0.154	
Schiste (h)	0.02			1.95	0.97	
Roche non poreuse (b) : granite, basalte, silex	3.50			2.17	16110	
MATERIAUX DE CONSTRUCTION						
Béton armé (I)	1.8	1080	2400		0.694	2160
Panneau plâtre (I)	0.4	792	1000		0.505	563
Brique terre cuite (J)	0.640/1.040	1008	1600-2400		0.397/0.430	1016/1586
Cuivre (J)	380	396	8930		107	36658
Laine de mouton, plumes (J)	0.06	1584	20		1.894	44
Laine de verre, panneau 20-60kg (I)	0.04	612	40		1.634	31
Polystyrène expansé, panneau 20-28kg (I)	0.038	1404	24		1.127	36
Polystyrène extrudé, panneau>25kg (I)	0.036	1404	25		1.026	36
Argile expansé, 350kg (I)	0.11	900	350		0.349	186
Terre compacte, humidité naturelle (I)	2.09	864	1700		1.422	1752
Gravier rond (I)	2.00	1051	2000		0.951	2050
Sable et gravier pour toiture (I)	0.7	792	1900		0.465	1026

(a) Fabry, 1942 (b) CSTB, 1977 (c) Van Wijk et Derksen, 1966 (d) Johnson, 1937 (e) Van Wijk et Vries, 1966

(f) De Vries, 1966 (g) Patten, 1909 (h) Handbook of Chemistry and Physics, CPC (I) SIA 381/1 (J) Courgey, 2006

Dans l'absolue, l'ajout d'une couche permet d'améliorer la performance thermique d'un élément de construction. La couche de substrat végétalisé supplémentaire, qui différencie les TV d'autres types de toiture, permettraient dans ce sens de réduire les flux thermiques des espaces intérieurs chauffés vers l'extérieur et donc la consommation énergétique pour le chauffage des bâtiments. Cependant, le λ de cet élément est de l'ordre de 10 à 100 fois supérieur à celui d'un matériau dit isolant ; en effet, à notre époque, les matériaux utilisés dans le domaine de la construction pour l'isolation des bâtiments se caractérisent par des valeurs comprises entre 0.06 et 0.028 W/(mK) pour les plus efficaces – voir tableau 1. L'effet de la couche de substrat végétalisé sera d'autant plus négligeable que la toiture est bien isolée. Cette observation est également mise en avant par Majory Musy [3] dans son ouvrage où elle précise que « les impacts seront plus faibles dans le cas de toitures déjà fortement isolées sous le substrat ». Connaître l'épaisseur d'isolant à partir de laquelle l'impact du substrat végétalisé peut être considéré comme négligeable est cependant une question qui reste en suspens. Elle rend également attentif au fait que « l'impact de la végétalisation du toit sur les besoins énergétiques [...] est moins important lorsque la surface représentée par le toit par rapport à l'enveloppe du bâtiment est faible », ce que confirme une étude de Martens et al. en 2008 qui montre également que « l'effet du toit végétalisé sur l'ensemble du bâtiment est plutôt faible dans des immeubles multi-étages [...] » [3].

Les TV et les TS devraient également se différencier au niveau de la résistance superficielle extérieure (R_{se}). Cette caractéristique quantifie la transmission de chaleur par convection et par rayonnement entre l'air ambiant et une surface extérieure [19]. A ce sujet, la norme *SIA 180 Isolation thermique et protection contre l'humidité dans les bâtiments* [7] fournit les valeurs conventionnelles des résistances de la couche limite extérieure en fonction de la direction du flux thermique, de la situation et de l'exposition de l'élément – voir tableau 2. Dans l'ouvrage *Mesures in situ en énergétique du bâtiment* [8], il est également indiqué que la température ambiante et la vitesse de l'air ainsi que l'état des surfaces, sont les facteurs qui influencent cette valeur¹.

Au regard des formules – voir tableau 2, la vitesse de l'air et la température de surface de l'élément s'avèrent être des variables prépondérantes respectivement pour la part convective et la part rayonnante. Or l'air s'écoulerait en théorie moins vite au-dessus de la végétation qui agit comme brise-vent et la température de surface des TV est en principe toujours plus faible au niveau des TV comparé au TS². L'émissivité* des surfaces rentre également dans le calcul de la part rayonnante. D'après la littérature, elle est plus faible pour du gravier et que pour une surface « végétalisée » – voir tableau 3. En théorie donc, la R_{se} pour une TV devrait être plus élevée que ces valeurs conventionnelles et participer à améliorer la performance thermique par rapport à une TS-1 par exemple.

Il faut cependant bien comprendre que les phénomènes décrits s'établissent à travers une surface foliaire* existante et une végétation en bonne santé ce qui implique une énergie solaire suffisante et un stock d'eau disponible.

¹ [8] page 355

² [3] page 74 [2] page 15

Tableau 2 : Valeurs conventionnelles des résistances des couches limites et formules théoriques avec part convective et rayonnante. Source des formules : [19].

Intérieur _ Rsi	(m ² ·K)/W	part convective:	
Paroi *	0.13	$h_{e,cv} \approx 7.13 \cdot v^{0.8} \cdot [T_e / 273]$	[W/(m ² ·K)]
Plafond *	0.13		
Dalle contre extérieur *	0.17	avec:	
Élément contre non-chauffé *	0.08	v	vitesse du vent (>1 m/s) [m/s]
flux ascendant **	0.10	T_e	température extérieur [K]
flux horizontal **	0.13		
flux descendant **	0.17		
surface intérieur ***	0.13	part radiative:	
Extérieur _ Rse		$h_{er} \approx 4 \cdot \epsilon_n \cdot \sigma \cdot T_m^3$	[W/(m ² ·K)]
Cas normal *	0.04	avec:	
Situation protégée *	0.10 - 0.05	ϵ_n	émissivité de la face extérieure de la paroi [-]
Constructions serrées *	0.05 - 0.04	T_m	température moyenne tel que:
Constructions éloignées *	0.04 - 0.02	$T_m = \frac{T_n + T_{\text{équi}}}{2}$	
Bâtiment solitaire *	0.02 - 0.01		
surface extérieure ** et ***	0.04	T_n	température de surface [K]
surface en contact avec la terre ***	0.00	$T_{\text{équi}}$	$\approx T_e$ par temps couvert [K]
		$T_{\text{équi}}$	$\approx T_e - 7$ par ciel clair, paroi sans vis-à-vis immédiat [K]

*source: SIA D 027:1989

**source: SIA 180.071:2007

*** source: SIA 180:2014

En conclusion, le fait que les toitures végétalisées permettent de limiter les déperditions thermiques en hiver grâce à des performances thermiques accrues ne semblent donc pas généralisables. L'état de la couche végétale, tel que sa teneur en eau et la qualité de sa couche foliaire, semble fortement conditionner ses caractéristiques thermiques et peuvent fortement modifier ces effets de ce point de vue. De plus, une même épaisseur d'un matériau isolant aura sans équivoque un impact nettement plus important sur les déperditions énergétiques et l'effet du substrat végétalisé sera d'autant plus négligeable que la toiture est bien isolée.

En été, les toitures végétalisées permettent de limiter les surchauffes à l'intérieure des bâtiments en évacuant la chaleur provenant du rayonnement solaire par évapotranspiration et agissent comme des climatiseurs passifs.

Sous l'effet du rayonnement solaire direct et diffus, les toitures, comme toute surface exposée, absorbent des quantités d'énergie sous forme de chaleur. L'albédo*, qui correspond à la fraction du rayonnement global d'origine solaire (rayonnement direct et diffus) qui est réfléchi par une surface horizontale dans un hémisphère, conditionne la quantité d'énergie qui sera absorbée³. Cette grandeur sans dimension est comprise entre 0 et 1 : un albédo nul correspond au corps noir parfait qui absorbe la totalité de l'énergie incidente alors qu'un albédo de 1 se rapporte au miroir qui réfléchit l'ensemble du rayonnement. L'albédo

³ [2] page 10

d'une surface dépend de sa couleur, de sa géométrie et peut également varier en fonction de l'humidité de sa surface⁴. Ainsi, les albédos de certaines surfaces sont fixes alors que d'autres, à l'image de l'eau, de la neige, des nuages et des couverts végétaux, se caractérisent par un albédo variable dans le temps et en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement. Dans ce contexte, la surface d'une TV devrait voir son albédo varier en fonction des saisons et de son activité photosynthétique qui modifie sa couleur au cours de l'année. Gérard Guyot [2] explique notamment que « lorsque le taux de chlorophylle est faible, la réflectivité peut largement dépasser les valeurs utilisées pour les surfaces végétales idéalisées »⁵. Au vue de la structure foliaire complexe de ces surfaces, l'albédo devrait également varier en fonction de l'incidence du rayonnement.

Tableau 3 : Propriétés radiométriques de différentes surfaces.

Type de surface	autres caractéristiques	Albédo (a)	Emissivité (ε)
Métal poli *	-	0.90 - 0.99	0.01 - 0.10
Eau *	faible angle zénithal de visée	0.03 - 0.10	0.92 - 0.97
	fort angle zénithal de visée	0.10 - 0.50	0.92 - 0.97
Neige *	ancienne	0.40 - 0.70	0.82 - 0.89
	fraîche	0.45 - 0.95	0.90 - 0.99
Glace *	de mer	0.30 - 0.40	0.92 - 0.97
	de glacier	0.20 - 0.40	-
Sable nu *	sec	0.35 - 0.45	0.084 - 0.90
	humide	0.20 - 0.30	0.91 - 0.95
Sol nu *	argileux sec	0.20 - 0.35	0.95
	argileux humide	0.10 - 0.20	0.97
	sol humide avec chaumes	0.05 - 0.07	-
Surfaces artificielles *	béton	0.17 - 0.27	0.71 - 0.88
	route goudronnée	0.05 - 0.10	0.88 - 0.95
Surfaces agricoles *	prairies	0.16 - 0.26	0.90 - 0.95
	cultures: blé, riz, etc.	0.10 - 0.25	0.90 - 0.99
	vergers	0.15 - 0.20	0.90 - 0.95
Forêts *	à feuilles caduques	0.10 - 0.20	0.97 - 0.98
	conifères	0.05 - 0.15	0.97 - 0.99
Gravier **		0.72	0.28
Sable **		0.24	0.76
Brique rouge **		0.20 - 0.30	
Goudron et gravier **		0.08 - 0.18	
Tôle ondulée **		0.10 - 0.16	
Herbe sèche **		0.3	
Sable sec **		0.20 - 0.30	
Gazon artificiel **		0.05 - 0.10	
Pigment blanc **		0.85	0.96
Pigment gris **		0.03	0.87
Pigment vert **		0.73	0.95

* source: G. Guyot_climatologie de l'environnement [2]

** Bretz et al, 1992

Il n'existe pas à notre connaissance d'étude précise concernant l'évolution en fonction du temps et des saisons de l'albédo d'une surface végétalisée que l'on peut trouver sur une TV. La littérature fournie cependant des valeurs générales pour des couverts végétaux – voir tableau 3. Les valeurs pertinentes à retenir pour ces surfaces vont alors de 0.10 à 0.26. Dans la catégorie des TS, on peut extraire de la littérature des valeurs de

⁴ [2] page 15

⁵ [2] page 10

0.08 pour le « goudron et gravier » – TS-2 - alors que le gravier - TS-1 -pourrait atteindre une valeur de 0.72 – voir tableau 3. En résumé, lorsque l’on compare les valeurs, il semble que les TV se caractériseraient plutôt par des albédos relativement faibles et absorberait dans ce contexte des quantités d’énergie relativement importante alors que d’autres toitures aurait la capacité de réfléchir plus de rayonnement et d’absorber moins de chaleur à l’image des TS-1.

Cependant, les phénomènes d’évapotranspiration* (ET) et de photosynthèse* (PS) caractéristiques de la végétation ont la capacité de dissiper la chaleur absorbée provenant du rayonnement solaire⁶. Sur les TV, ces processus permettraient de limiter l’accroissement de la température de surface, notamment au niveau de la membrane d’étanchéité au-dessus de l’isolation. Ce résultat est mis en exergue dans de nombreuses publications⁷. Dans ce sens, Marjory Musy [3] cite l’étude réalisée au Japon en 1991 où Onmura et al. (2001) parlent d’une réduction de température de surface au niveau de la membrane d’étanchéité de 30°C grâce à l’application de module de toitures végétalisées et Teemusk et Mander confirme cette tendance avec leur étude réalisée entre juin 2004 et avril 2005 en Estonie. En effet, le changement de phase de l’eau consomme une certaine quantité d’énergie – chaleur latente d’évaporation de l’eau*, chaleur qui n’est pas utilisée pour réchauffer la matière.

Par conséquent donc, lorsque la température extérieure ambiante est importante en été, les processus d’ET et de PS, qui limite l’accroissement de la température de surface extérieure des TV par rapport aux TS, permettrait de réduire le flux de chaleur entrant dans le bâtiment, les surchauffes intérieures et donc les besoins en climatisation. Ce phénomène a été apparemment mis en avant dans plusieurs études expérimentales, notamment aux EU⁸ et au Canada⁹. Les graphiques publiés montrent des amplitudes de flux thermiques mesurés plus faibles à travers des toitures équipées d’un système de végétalisation extensive comparé à la même toiture non végétalisée ou seulement recouverte d’une couche de gravier.

Toutefois, on peut s’interroger sur la robustesse des conclusions que nous en tirons. En effet, le capteur de densité de flux thermique* est dans les deux cas positionné à l’extérieur au-dessus de l’isolation de la toiture et dans le cas de la TV en dessous du substrat végétalisé¹⁰. Dans ce contexte, ceux sont les flux thermiques qui entrent ou qui sortent au niveau de ces couches que nous examinons en premier lieu. En effet, il est important ici de considérer le phénomène de déphasage thermique* qui consiste à obtenir un décalage temporel entre le pic de chaleur extérieur et intérieur en période estivale. Au vu notamment des phénomènes de stockage et de déstockage de chaleur journalier qui s’opèrent généralement dans les éléments de construction selon leurs caractéristiques, nous n’avons ici que peu d’informations sur les charges qui affectent réellement les espaces intérieurs.

De plus, l’analyse journalière des profils de températures de surface, notamment dans le contexte de ces études, montre que la réduction de la température au cours de la journée est suivie par une température plus haute durant la nuit¹¹. Les phénomènes de déstockage de chaleur au cours de la nuit lorsque la température extérieure est plus faible que la température de l’élément devraient donc être plus limitées au niveau d’une TV et donc réduire le « rafraîchissement » nocturne potentiel dans ce sens.

⁶ [2] page 33 [3] page 37

⁷ [3] page 74

⁸ [8] Saadatian et al. (2008) A review of energy aspects of green roofs.

⁹ [9] Liu, K ; Minor, J. (2010) Performance evaluation of an Extensive green roof, city of toronto.

¹⁰ [8] page 159 [9] page 3

¹¹ [3] page 74

Dans tous les cas, les processus d'ET nécessitent de l'énergie à convertir et surtout un stock d'eau à évaporer. Il est donc important de noter qu'en l'absence d'eau et dans un contexte de sécheresse, la capacité de la TV à évacuer la chaleur par ET est faible. De plus, le phénomène de transpiration des plantes dépend également de l'espèce, «les plus résistantes ayant la capacité de retenir l'eau qu'elles contiennent» comme le précise Marjory Musy dans son ouvrage¹².

Comme cela a déjà été souligné dans les paragraphes précédents, il faut également noter que l'intensité des effets théoriques induits par les TV sur les espaces intérieurs est relative au rapport entre la surface de la toiture et le reste de l'enveloppe ainsi qu'au niveau d'isolation de base de l'élément.

En conclusion, la mise en œuvre de TV pour limiter les surchauffes estivales à l'intérieur des bâtiments ne semble pas non plus être une affirmation généralisable. La présence d'un substrat végétalisé et les effets sur les flux thermiques dans cette couche ou sur la température de la membrane d'étanchéité par exemple sont confirmés dans plusieurs études. Cependant, l'impact sur les espaces intérieurs et le rôle de « climatiseur passif » que joue la TV ne semble pas avoir encore été clairement mis en exergue en conditions réelles.

En été, les TV permettent de rafraîchir le microclimat environnant et limite la formation des îlots de chaleur urbain et leurs impacts sur le confort en ville.

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) correspond à une augmentation des températures en milieu urbain par rapport à sa périphérie. Il représente un problème non négligeable car il occasionne de l'inconfort thermique pour les habitants ainsi que des problèmes de santé publique. De nombreuses recherches ont été menées afin de comprendre le processus de formation des ICU et de proposer des solutions dans le but de favoriser l'acclimatation des habitants des villes et de réduire l'augmentation des températures. L'environnement construit est considéré comme un des vecteurs d'influence important notamment au regard des matériaux minéraux à forte inertie thermique qui piège la chaleur et la restitue de manière défavorable sur des cycles journaliers. De manière générale, les surfaces à faible albédo et à faible perméabilité sont également mises en cause.

Parmi les techniques aujourd'hui connues pour mitiger le phénomène d'ICU, les toitures réfléchissantes de couleur clair et caractérisées par un albédo élevé sont aujourd'hui dans la boîte à outils des planificateurs et des concepteurs^{13 14}. La capacité de ces toitures à renvoyer une grande quantité d'énergie reçue directement vers le ciel grâce à leur albédo est un moyen de limiter le stockage de la chaleur.

La végétalisation des toitures est également considérée comme un moyen pour limiter le phénomène d'ICU. Toutefois, au vu de l'albédo, il faut bien comprendre que les TV ne sont pas dans la catégorie des toitures dites réfléchissantes tel que présenté précédemment. Une autre stratégie est à mettre en avant dans ce cas. Comme expliqué dans les paragraphes précédents, les TV ont la capacité de dissiper la chaleur provenant du rayonnement solaire par ET et PS. Ces processus peuvent théoriquement influencer la limitation des surchauffes à l'intérieur des bâtiments - effets directs - ceci étant également très dépendant du mode de construction et de l'inertie thermique du support. Ils peuvent parfois aussi avoir des effets indirects comme la

¹² [3] page 36

¹³ [11] Köhler et al (2003) Green roofs as a contribution to reduce urban heat islands. Germany.

¹⁴ [12] CREM (2008) Matériaux réfléchissants et perméables pour contrer les îlots de chaleur urbains. Canada.

limitation de la formation des ICU. En effet, une partie de la chaleur absorbée par les TV va pouvoir être dissipée sans réchauffer la matière et l'atmosphère en induisant un flux de chaleur sensible plus faible¹⁵.

Dans son ouvrage, Marjory Musy précise cependant que cet impact indirect reste faible vis-à-vis de la modification du climat urbain et de l'amélioration du confort des habitants en ville¹⁶. De plus et encore une fois, ceci implique qu'il existe un stock d'eau suffisant dans le substrat pour que les processus d'ET et de PS ait lieu. Dans le cas contraire, il semble que les toitures dites réfléchissantes – caractérisé par un albédo élevé, soit une solution plus robuste et rationnelle pour limiter l'augmentation de la température de l'air extérieur en renvoyant une quantité plus importante de rayonnement solaire directement vers la voûte céleste.

Il existe d'autres concepts qui encouragent aujourd'hui la végétalisation en ville dans une perspective de limiter l'ICU et d'améliorer le confort. Certains types de végétation apportent de l'ombre et permettent à l'instar d'un parasol de protéger les surfaces et les personnes d'un rayonnement solaire fort et direct. On parle alors de masque solaire et ce ne sont plus des TV. Dans ce sens, on peut toutefois distinguer les effets entre une toiture végétalisée intensive et extensive. La première pourra accueillir des arbres et arbustes qui ont une structure racinaire plus profonde et éventuellement un effet de masque solaire alors que l'autre se compose uniquement d'une surface foliaire de faible hauteur.

Synthèse

Les effets attendus des TV ont été présentés. Des nuances ont également été mises en avant et elles encouragent à poursuivre les études sur cette thématique. Chaque TV est différente en fonction du substrat et de la végétation qu'elle supporte mais également de l'épaisseur de l'isolation et des caractéristiques du support qui la compose. Il semble donc pertinent de chacune les étudier comme des objets spécifiques dans des contextes particuliers.

Cette revue de littérature et les nuances mises en exergue sont importantes dans la mesure où notre souhait est d'évaluer correctement l'impact des TV par rapport aux TS sans exagérer hâtivement ces effets positifs du point de vue thermique et énergétique, notamment en se référant concrètement à l'intérieur du bâtiment étudié. L'approche de la mesure et surtout la définition des limites des systèmes considérés s'avèrent primordiales à toute interprétation des résultats d'études expérimentales.

Les recherches sur ce thème sont nombreuses et les conclusions sont globalement bienveillantes concernant les TV. A l'échelle des autorités publiques, notamment des villes, l'intéressement pour les TV est par conséquent assez net et les programmes d'incitation prennent place au sein des politiques publiques urbaines afin de favoriser et inciter à la mise en œuvre des TV. Dans *Green roof policies: tools for encouraging sustainable design* en 2004¹⁷, Goya Ngan montre très clairement l'engouement des collectivités territoriales sur cette thématique en analysant les politiques mises en place à une échelle mondiale. A notre échelle géographique, la ville de Lausanne par exemple, à travers le Service des parcs et domaines de la ville, a notamment publié un guide de recommandation sur les TV¹⁸ en 2014 afin d'assurer leurs promotions auprès

¹⁵ [3] page 56

¹⁶ [3] page 106

¹⁷ [13] Ngan, Goya (2004) *Green Roof Policies: Tools for Encouraging Sustainable Design*.

¹⁸ [14] Service des parcs et domaines de la ville de Lausanne (2014). *Toitures végétalisées - Guide de recommandations Pourquoi et comment accueillir la nature sur son toit*.

des professionnels de la construction et des propriétaires et inciter leurs implémentations et leurs mise en œuvre dans les projets. Le document annonce également la possibilité d'obtenir un « coup de pouce financier » dans le cas de la végétalisation extensive de toitures plates relevant du domaine privé, ce qui représente un réel parti pris.

A Genève, les planificateurs sont encore dans une phase de recherche afin d'orienter correctement leur gouvernance à ce sujet. Il s'agit également avec cette étude à une échelle locale de fournir des recommandations et des aides à la décision.

PARTIE 2 : TRAVAIL DE RECHERCHE APPLIQUÉE À GENÈVE

Dans le cadre de ce projet et en tant que partie prenante, l'équipe du Laboratoire Energie Environnement et Architecture – LEEA hepia, a pour mission d'investiguer l'impact des toitures végétalisées sur le micro climat urbain et sur la qualité thermique des bâtiments. L'étude est guidée par les trois hypothèses de travail définies dans la revue de littérature ci-dessus et l'analyse prête une attention particulière aux nuances identifiées dans les paragraphes précédents.

A travers plusieurs expériences, il s'agira de :

- Mesurer l'albédo d'un couvert végétal de TV afin de catégoriser les TV pour cette composante thermique ;
- Mesurer les flux thermiques au niveau de TV et de TS ainsi que les températures qui régissent ces flux, afin d'évaluer l'impact de la couche végétalisée sur l'enveloppe et la qualité thermique du bâtiment ;
- Mesurer les températures extérieures en différents lieux afin d'évaluer l'impact de la TV sur l'ambiance climatique environnante ;

2.1. Toitures à l'étude

Pour ce volet de l'étude, plusieurs critères étaient recherchés afin de sélectionner les TV à étudier. La situation de la TV en zone urbaine dans des milieux relativement « minéral » est une première caractéristique importante afin de d'exclure le plus possible les effets potentiels d'éventuels « espaces verts » à proximité.

L'étude des quatre types de TV, à savoir des TV extensives et intensives de moins et de plus de dix ans - considérés comme la première clef de classement - a également été intégré dans le travail de sélection, au même titre que la nature des espaces situés directement en dessous : en effet la présence de locaux chauffés est un élément important pour la pertinence des mesures.

Enfin l'accessibilité du site avec le matériel de mesures et l'accord des propriétaires des bâtiments où sont implantées les TV pour déployer les installations et réaliser les expériences décrites dans les paragraphes suivants, ont été des critères également déterminants.

Ainsi, sur les dizaines de TV disponibles, quatre ont été retenues pour ce volet de l'étude. Elles sont présentées et décrites dans le tableau 4 et aux figures 2 et 3.

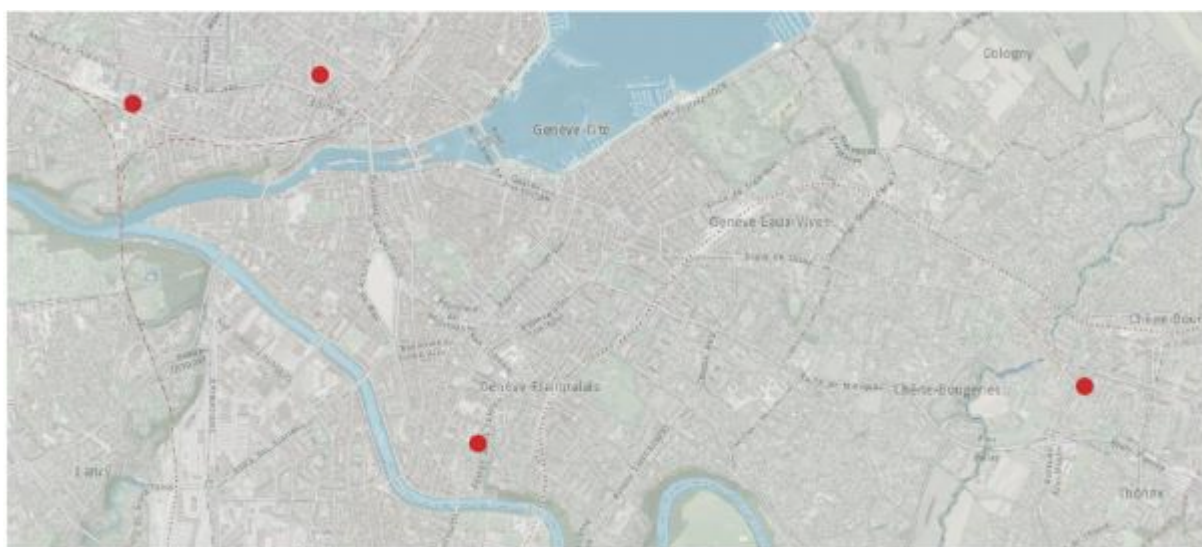


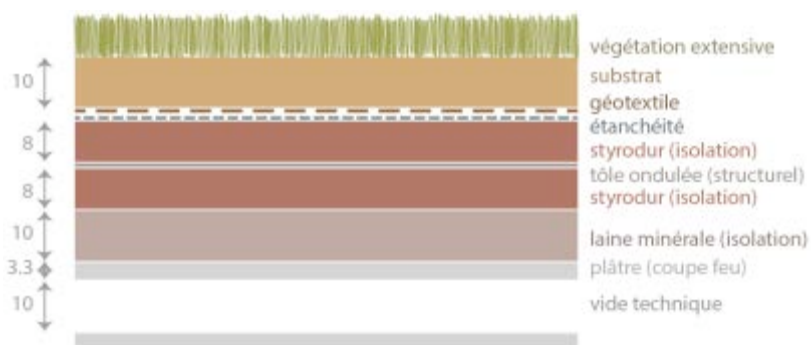
Figure 2 : Repérage géographique des 4 TV à l'étude - source du plan : sitg.ch

Tableau 4 : Description des quatre TV à l'étude.

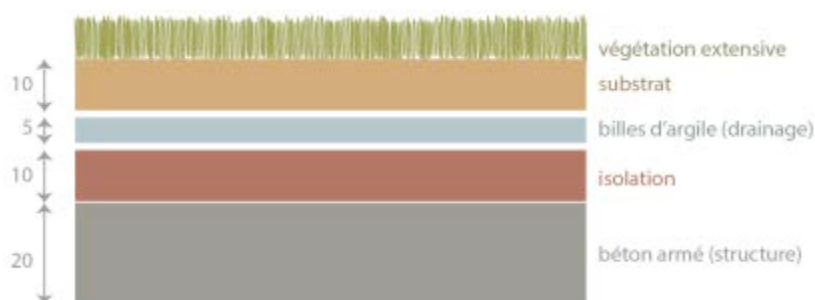
La valeur « U calculé » est obtenue par calcul à partir de la composition théorique - voir figure 3 - et des valeurs sur les caractéristiques thermiques des matériaux de la tableau 2 – pour le substrat végétalisé, le calcul a été effectué avec une valeur de conductivité thermique de 0.2 et de 2 W/(mK) – voir tableau 1.

Dénomination de la TV	HEAD TV	HEAD TG	EUROPE	HUGUP	PETIT-SENN
Bâtiment	Haute école d'art et de design, HES-SO Genève	Haute école d'art et de design, HES-SO Genève	Ecole de l'Europe	Hopitaux Universitaires de Genève - Urgence pédiatrique	Ecole du Petit-Senn Agrandissement
Adresse	Rue de la Prairie, 4 1202 Genève	Rue de la Prairie, 4 1202 Genève	Avenue d'Aire, 42 1203 Genève	Avenue de la Roseraie, 47 12 Carouge	Avenue du Petit-Senn, 13 1225 Chêne-Bourg
Numéro de référence	14	14	15-16-17	62	44
Type	Extensive de moins de 10 ans	Extensive de moins de 10 ans	Extensive de plus de 10 ans	Intensive de moins de 10 ans	Intensive de plus de 10 ans
Année de réalisation	2010	2010	1996	2003	1992
Locaux situés en dessous	Salles de classe chauffées	Salles de classe chauffées	Salles de classe chauffées	Salles d'attente et bloc opératoire	Salles de classe chauffées
Nombre d'étages	4 niveaux	4 niveaux	4 niveaux	2 niveaux	1 niveau
Surface (m2)	630	20	550	700	450
Standard de construction	HPE	HPE	-	-	-
U calculé	0.130 - 0.138	0.138	Absence de plans	0.242 - 0.309	0.270 - 0.330
U limite ou considérée dans le projet	0.16 Projet	0.16 Projet	0.40 SIA 380/1 1988 [17]	0.30 SIA 380/1 2001 [18]	0.40 SIA 380/1 1988 [17]

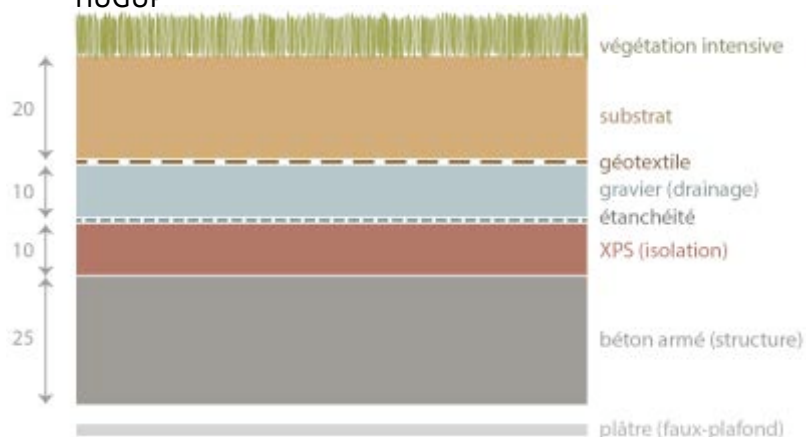
HEAD TV - Substrat : 80% Brique concassée



EUROPE



HUGUP



PETITSENN

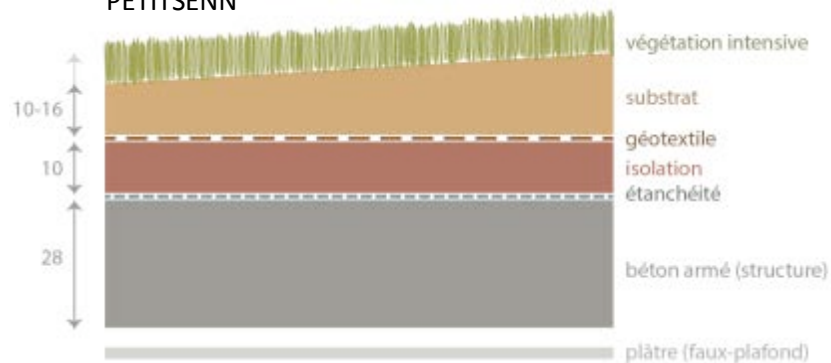


Figure 3 : Illustrations et coupes schématiques des quatre TV sélectionnées pour le volet Thermique de l'étude; de haut en bas et de gauche à droite : HEAD, EUROPE, HUGUP et PETIT-SENN. Les cotes sont en cm.

2.2. Généralités sur les expériences et la présentation des résultats

L'analyse du comportement thermique d'un bâtiment est complexe. La nature et les interactions entre les différents éléments qui le composent sont nombreuses. Les approches expérimentales consistent à étudier les éléments indépendamment des autres afin de comprendre leur comportement ou à étudier les éléments avec le reste de la structure. Les expériences peuvent être menées dans l'environnement maîtrisé d'un laboratoire à l'échelle 1 : 1 ou sur des maquettes à échelle réduite. L'étude peut également être conduite in-situ dans leur contexte réel. Dans ce dernier cas, les objets sont alors exposés aux conditions météorologiques et climatiques réels et également aux effets des installations techniques et des usagers.

Un certain nombre d'expériences décrites dans les paragraphes suivants ont été réalisées sur l'ensemble des TV à l'étude. Elles permettent de comparer les résultats en fonction du type de toiture – extensive et intensive de plus ou moins 10 ans.

D'autres mesures n'ont été réalisées que sur la HEAD. Lors de la mise en œuvre de la végétalisation sur la toiture au-dessus de l'étanchéité et du géotextile, une surface d'environ 20 m² n'a pas été recouverte par du substrat mais simplement avec du gravier rond – voir Figure 4. Les deux zones ont alors été instrumentées : la partie recouverte de gravier rond - HEAD TG assimilable à une TS-1 - sert de toiture de référence pour mettre en perspective les résultats obtenus au niveau de la partie végétalisée – HEAD TV.

Cette situation est relativement idéale car l'espace situé directement en dessous de la toiture correspond presque à la même pièce et les conditions en termes de température et d'humidité de part et d'autre de ces éléments devraient être relativement similaires. De plus, ce terrain d'expérience a l'avantage d'être facilement accessible.



Figure 4 : Toiture de la HEAD - photographie montrant les zones TG et TV.

2.3. Expériences et résultats

2.3.1. Albedométrie

2.3.1.1. Expérience et protocole

L'albédo d'une surface peut être mesuré en utilisant un albedomètre. Cet instrument – figure 5, se compose de deux pyranomètres* positionnés à deux mètres de haut et qui mesurent respectivement le rayonnement solaire incident* (SWin), et réfléchi* (SWout). L'appareil de type Hukseflux NR01/RA01* est connecté à un *datalogger* CR1000* qui enregistre une valeur par minute. Elle correspondant à la moyenne des valeurs mesurées toutes les 10 secondes pendant cette minute. Cette expérience a été menée entre le 24 avril et le 16 octobre 2015 sur la TV HEAD. La position de l'appareillage sur la toiture est indiquée à la figure 5.

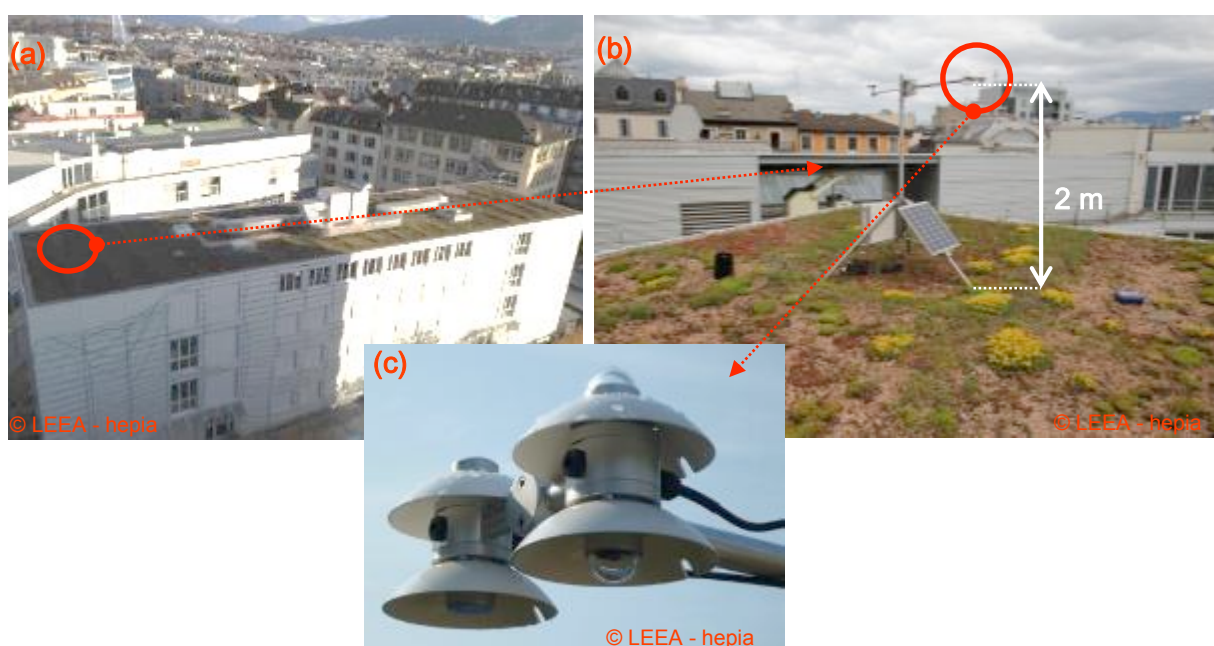


Figure 5 : Albedométrie.

(de haut en bas et de gauche à droite) (a) Position de l'albedomètre sur la toiture de la HEAD (b) Appareil de mesure complet développé pour le calcul de l'Etp* (c) Zoom sur le radiomètre net qui mesure les 4 rayonnements longes et courtes ondes, entrants et sortants (SWin, SWout, LWin, LWout).

Ces mesures sont également utilisées pour le calcul de l'Evapotranspiration potentielle* (ETp) pour lequel le LEEA a développé un appareil de mesure complet – voir Figure 5. Il consiste en une station climatique fixe qui mesure et enregistre un nombre important de grandeurs physiques. En collaboration avec les équipes « Hydrologie » et « Substrat », elles sont ensuite utilisées pour le calcul de l'ETp* d'une surface végétalisée standard à travers la formule de Penman-Monteih* de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (PM-FAO). Cette formule a l'avantage d'être très complète et de prendre en compte une quantité importante de grandeurs physiques pour évaluer l'ETp. Pour plus de détails concernant cette mesure et les résultats, consultez le chapitre X de la partie X de ce rapport.

2.3.1.2. Résultat : albédo de la surface végétalisée

Le graphique à la figure 6 représente le quotient SW_{out}/SW_{in} en fonction du temps, c'est-à-dire l'albédo calculé instantanément à chaque pas de temps. Cette représentation permet d'apprécier l'évolution de l'albédo dans le temps mais de nombreuses valeurs sont à écarter, par exemple celles de nuit qui n'ont pas de sens en l'absence de rayonnement solaire. Durant la période de mesure la TV HEAD s'est retrouvée dans différents états en fonction des saisons et des interventions sur la toiture – une entreprise de paysagisme est intervenue fin juillet 2015 pour effectuer un entretien. Ces événements sont repérés temporellement sur le graphique et complétés par des photographies de la TV HEAD.

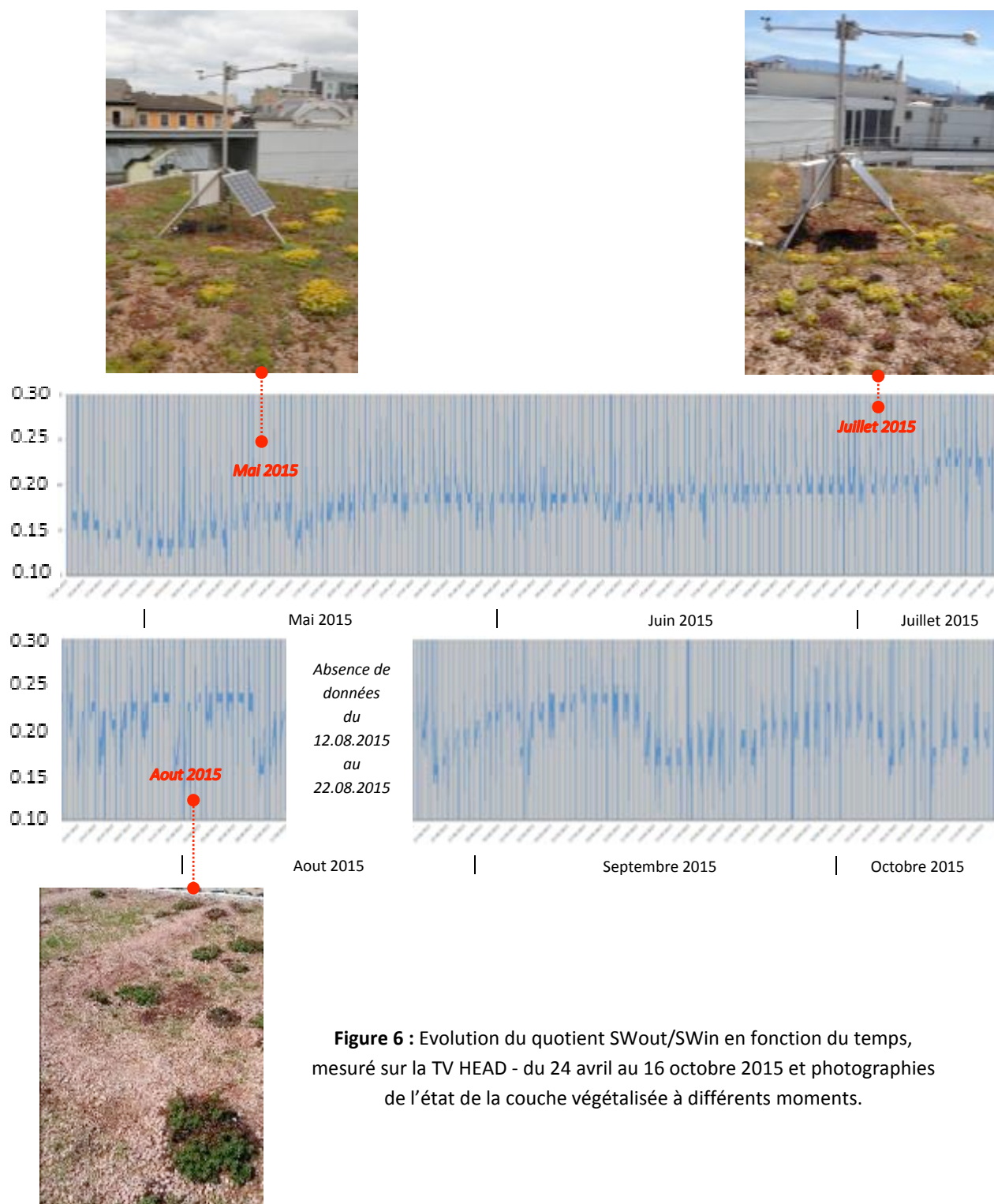


Figure 6 : Evolution du quotient SW_{out}/SW_{in} en fonction du temps, mesuré sur la TV HEAD - du 24 avril au 16 octobre 2015 et photographies de l'état de la couche végétalisée à différents moments.

Cette mise en forme des données permet d'apprécier la variation de l'albédo instantané durant la période de mesure. Les valeurs oscillent globalement entre 0.12 à 0.24 et reflètent de toute évidence les changements d'état de la TV HEAD au cours du temps.

Afin d'obtenir une valeur représentative et caractéristique de l'albédo moyen de cette surface, un calcul statistique a été réalisé sur une série de valeurs d'albédo journalier répondant à un certain nombre de conditions, telles qu'un rayonnement solaire incident suffisamment élevé – supérieur à 200 W/m², et la prise en compte des valeurs de rayonnements seulement entre 12h et 15h. La figure 7 présente le boxplot obtenu.

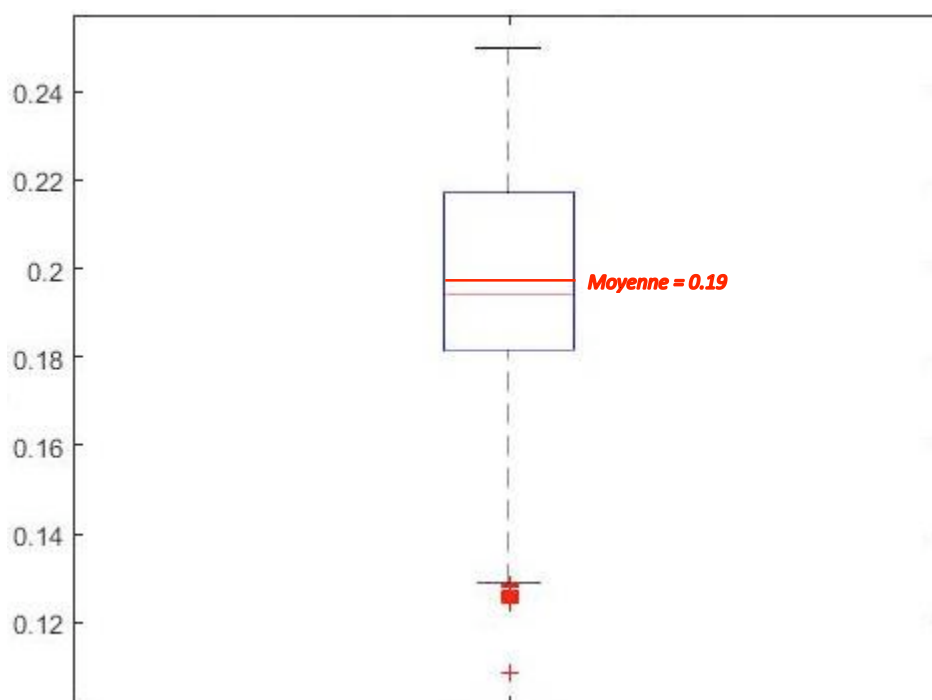


Figure 7 : Boxplot représentant la répartition statistique des valeurs d'albédo mesurées sur la TV HEAD entre le 24 avril et 16 octobre 2015.

Sur les 25'199 valeurs d'albédo éligibles, la valeur moyenne à retenir est donc **0.19** pour la TV HEAD avec une plage de variabilité dominante entre 0.18 et 0.22 et des valeurs extrêmes de 0.13 et 0.25.

Dans le cadre d'un autre projet effectuant la même expérience – projet TherSOL¹⁹, une valeur de **0.33** a été mesuré au-dessus d'un couvert végétal type gazon de nature et composition différente. Cette seconde expérience pourrait traduire la variabilité de l'albédo d'une surface végétalisée et le fait qu'il semble difficile de définir une valeur précise et unique pour ce type de surface.

Les valeurs obtenues ici sont cependant comparables aux données de la littérature et les mesures confirment la catégorie relativement « absorbante » de ce type de surface par rapport à d'autre type de toiture pouvant être bien plus réfléchissante.

Il paraît important de renouveler cette mesure sur d'autres TV extensives et intensives et également des TS afin d'évaluer les albédos de ces éléments dans l'objectif de valider clairement la catégorie d'albédo grâce à

¹⁹ TherSOL est également est également un projet du programme Nature et ville.

un échantillon plus étendu mais également pour identifier les différences qui peuvent exister d'une TV à une autre. Le couvert végétal de la TV étudié dans le cadre de cette expérience est relativement particulier. En effet, la toiture de la HEAD a fait l'objet d'un entretien à la fin juillet qui a mis à l'air libre une bonne partie du substrat composé à 80 % de brique concassée. D'un point de vue général, ce serait des événements à prendre en considération et il serait intéressant de pouvoir analyser plus en profondeur l'albédo en fonction de l'évolution de la végétation au fil des saisons.

2.3.2. Mesure des flux thermiques et des températures afférentes

2.3.2.1. Expérience et protocole

FLUXMÉTRIE

Cette expérience consiste en l'installation d'un capteur de mesure de la densité du flux thermique, couramment appelé fluxmètre - Hukseflux HFP01*, et de capteurs de mesure des températures ambiantes et de surfaces à l'intérieur - thermocouples type K, branchés sur un Datalogger CR800* qui enregistre une valeur par minute. Cette valeur correspond à la moyenne des valeurs mesurées toutes les secondes pendant cette minute. La figure 8 présente le schéma de principe de l'installation ainsi que plusieurs photographies illustrant les installations in situ.

Le fluxmètre est positionné sur l'élément à l'intérieur du bâtiment. Ce choix est principalement motivé par le fait que nous souhaitons étudier les charges de chaleur et les phénomènes physiques qui s'opèrent et affectent concrètement les espaces intérieures ; comme expliqué précédemment dans la revue de littérature, un fluxmètre positionné à l'extérieur nous semble moins pertinent pour observer les phénomènes physiques qui nous intéressent ici. De plus, le guide SIA [8] et les normes ISO 9869:1994 [15] et 9869-1:2014 [16] Isolation thermique-Eléments de construction-Mesurage in situ de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique fournit le cadre expérimentale pour le « mesurage des propriétés de transfert thermique de composants de bâtiment plans » et précise que le fluxmètre doit être positionné à l'intérieur à l'abri du rayonnement solaire direct et où la température est normalement plus stable. Une fine couche de pâte thermique a été utilisée pour assurer le contact thermique entre le capteur et l'élément de construction – voir figure 8.

Les thermocouples utilisés pour la mesure des températures de surfaces intérieures sont positionnées sous le fluxmètre, comme le précise les normes ISO 9869 [15] [16] et dans l'optique d'éviter certaines corrections d'erreurs d'opération²⁰. Pour la mesure des températures ambiantes intérieures, le thermocouple est positionné à environ 30 cm de l'élément à mesurer à l'aide d'une tige de support – voir figure 8.

L'expérience a été conduite entre décembre 2014 et janvier 2016 afin de compiler des mesures sur au moins une année entière au niveau de chacun des cinq points de mesure répartis sur les quatre toitures à l'étude.

HIVER : MESURE DES TEMPÉRATURES DES COUCHES SUPERFICIELLES EXTÉRIEURES

Pendant la période hivernale, les températures ambiantes et des couches superficielles extérieures ont été mesurées dans l'optique de mesurer les valeurs du coefficient de transmission thermique U comme décrit dans le guide SIA [8] et les normes ISO 9869 [15] [16]. Pour des bâtiments chauffés, on réalise généralement cette expérience en hiver, quand la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est la plus importante impliquant ainsi des flux thermiques élevés.

Dans ce sens, deux stations de mesure ont été préparées et installées sur les toitures – voir figure 8. Elles sont chacune équipées de sondes Rotronic PT-100* et Hygroclip2 HC2-S(3)* positionnées respectivement dans le substrat à 5cm de la surface et à 150cm de haut et branchées sur un boîtier Rotronic Log-HC2* qui enregistre les valeurs de température instantanée toutes les 5 secondes. Entre décembre 2014 et février 2015, elles ont effectuées des rotations d'au minimum deux semaines sur chacune des TV à l'étude.

²⁰ [15] page 9

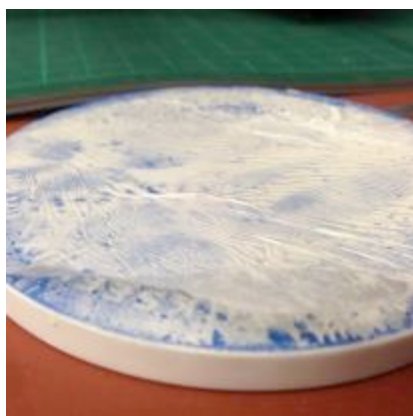
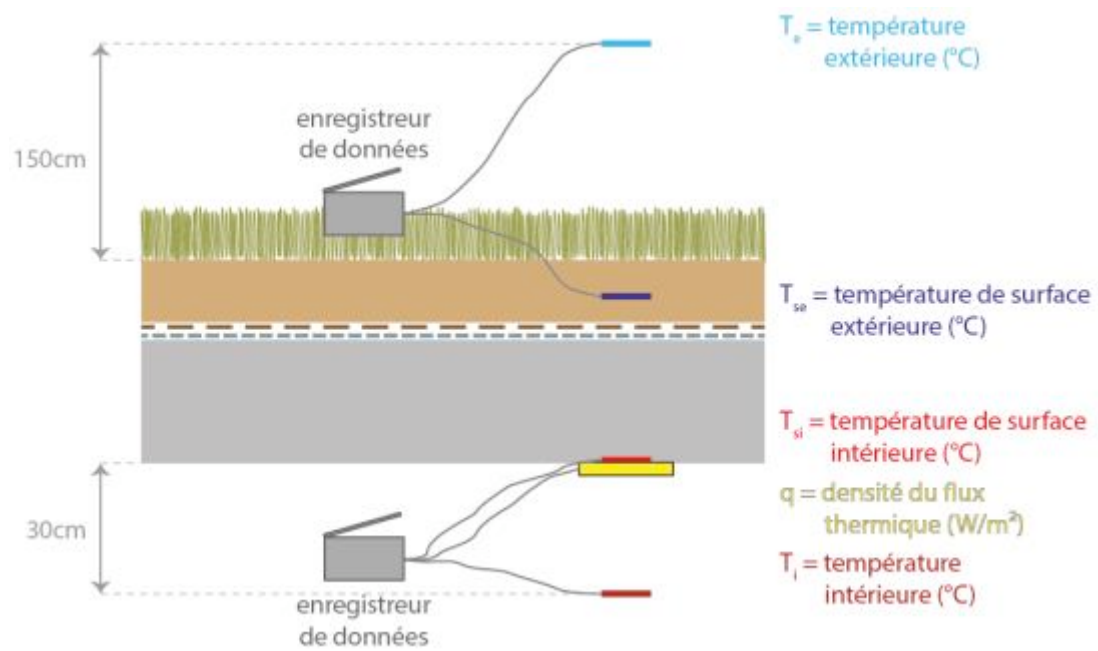


Figure 8 : Fluxmètrie et mesurage des températures des couches superficielles extérieures en hiver - Schéma de principe et illustrations des points de mesure.

ÉTÉ : MESURE DES TEMPÉRATURES DES COUCHES SUPERFICIELLES EXTÉRIEURES

Afin d'étudier les phénomènes au niveau de la surface de la toiture en période estivale et d'alimenter la réflexion sur les régimes de flux thermique, plusieurs thermocouples ont été installés sur la toiture de la HEAD – voir figure 9. Les quatre mesures sont les températures de surfaces de la membrane géotextile au niveau de la TG – T_{Stg} , et au niveau de la TV sous le substrat – T_{sub} , la température du substrat mesuré au milieu de l'épaisseur – T_{sub} , et la température à la surface extérieure du substrat - T_{Stv} . Durant la période allant du 21 aout au 16 octobre 2015, les données ont été enregistrées à intervalle de 30 minutes.

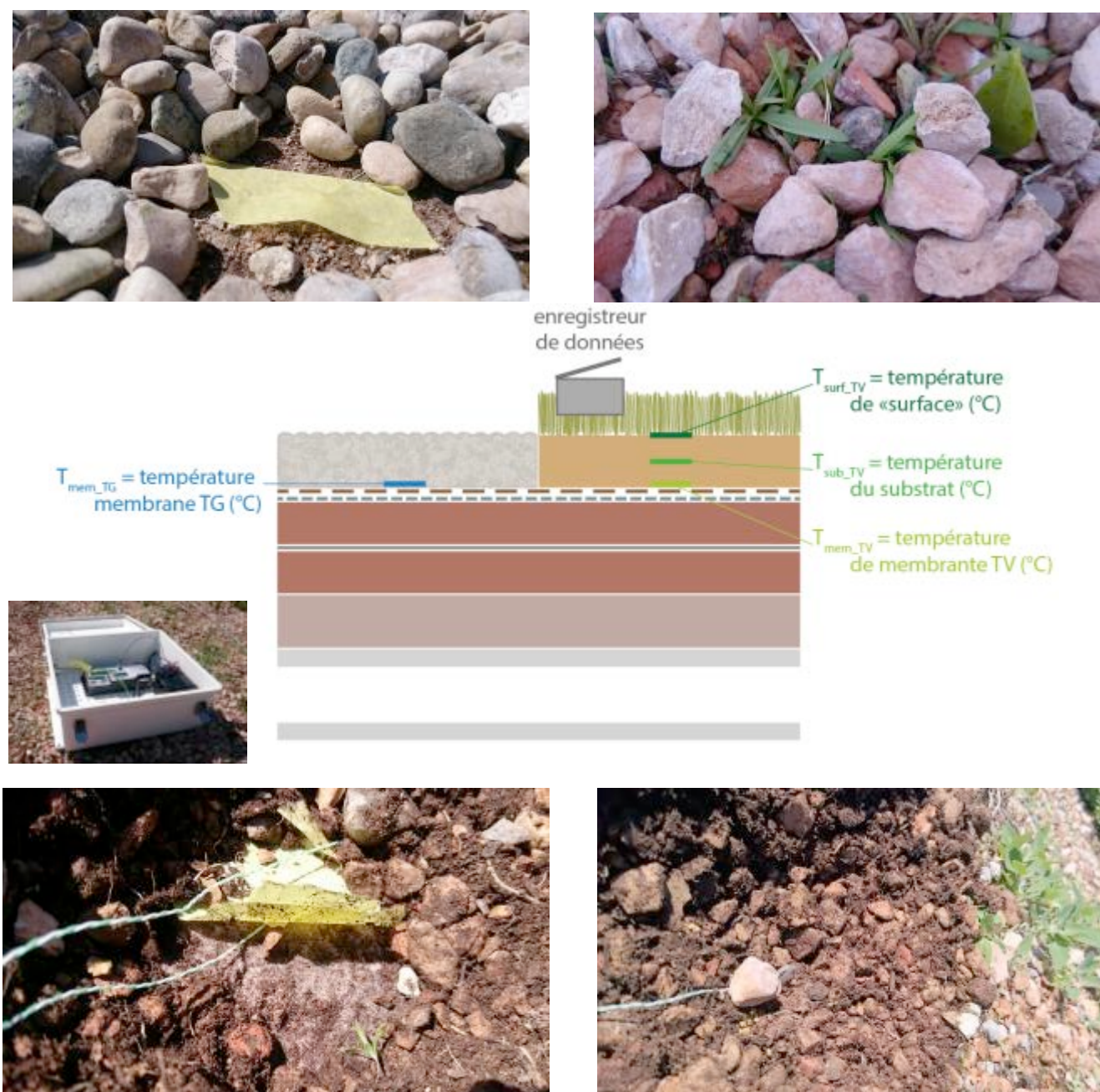


Figure 9: Station de mesure installée sur la toiture de la HEAD pour les températures de surface et du substrat.

2.3.2.2. Résultats

HIVER

Pour la mesure de la valeur U^* et dans le contexte d'ambiances hygrothermiques maîtrisées de part et d'autre de l'élément mesuré en régime stationnaire – méthode des boîtes chaudes et froides par exemple, il est relativement aisé d'obtenir une mesure fiable et de qualité sur des périodes courtes. Dans notre cas, la méthode consiste à admettre que les valeurs moyennes de densité de flux thermique et des températures prises sur une durée suffisamment grande donnent une bonne estimation du régime stationnaire [8] [15] [16].

L'application des techniques d'évaluation in situ des performances thermiques des éléments de construction est stricte et nous permet d'obtenir des valeurs fiables seulement dans certaines conditions. Ainsi, la quantité de chaleur contenue dans l'élément doit être la même à la fin et au début de la mesure et donc que les températures et la distribution de l'humidité de part et d'autre de l'élément soit similaire à la fin et au début de l'expérience. La stabilité des températures intérieures est également une caractéristique importante pour l'obtention d'une valeur fiable. Le fluxmètre ne doit pas être exposé à des flux thermique perturbateurs - éclairage, équipement et occupation - et au rayonnement solaire direct tout comme la surface extérieure de l'élément mesurée. Le respect de ces conditions apportent de la qualité aux résultats obtenus in situ et sont indépendants des tests qu'il faut également réalisés sur les valeurs enregistrées pour la validation des mesures – voir paragraphes suivants.

Deux méthodes de calcul et d'analyse ont été considérées dans le cadre de cette expérience. La méthode de la moyenne consiste à calculer le coefficient de transmission thermique U ($W/(m^2.K)$) à partir de la formule ci-dessous - avec q , la densité du flux thermique (W/m^2) et T_i et T_e , les températures intérieures et extérieures ($^{\circ}C$). L'indice j dénombre les mesures prises à chaque enregistrement.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q}{\sum_{j=1}^n (T_i - T_e)} [W/(m^2.K)]$$

Si l'estimateur est calculé après chaque enregistrement – U instantané, on observe une convergence vers une valeur asymptotique – U convergent, proche de la valeur réelle si les conditions de mesurage in situ sont réunies. Pour des éléments lourds, dépassant $20 \text{ kJ.m}^2.K$ – ce qui est le cas de nos toitures, la durée d'enregistrement minimale est de trois jours sur un nombre entier de jours²¹. Cette approche représente la première méthode. La documentation SIA [8] présente une méthode permettant de s'assurer de la fiabilité du résultat basée sur le seul critère intrinsèque, c'est-à-dire celui provenant de la mesure elle-même²². Cette approche – méthode 2, a également été considéré pour valider les valeurs mesurées sur le terrain.

Les normes [15] [16] documentent une approche qui également sur cette formule et sur une durée minimale de test de 72 heures et une validation de la valeur calculée avec plusieurs conditions²³. Cette approche représente la seconde méthode utilisée dans ce projet – méthode 3.

²¹ [8] page 358

²² [8] page 360

²³ [15] page 7

Pour la sélection des échantillons d'analyse, une attention particulière a donc été portée sur la stabilité des températures de part et d'autre de l'élément, sur le rayonnement solaire et sur les installations techniques des bâtiments étudiés. Les locaux situés en dessous de la toiture de la HEAD, sont des salles de classe utilisées par les étudiants de l'école ; PETITSENN et EUROPE sont quant à elles des écoles primaires. Les mesures effectuées durant les périodes de vacances scolaires de fin d'année 2014-2015 – du samedi 20 décembre 2014 au lundi 4 janvier 2015 , et en février 2015 - du samedi 7 au lundi 16 février 2015, représentent en principe des séries de données intéressantes dans le sens où les espaces intérieurs chauffés sont potentiellement moins utilisés pour HEAD et fermés pour PETITSENN et EUROPE.

Pour 3 des 5 points de mesure – HEAD-TV, HEAD-TG et EUROPE - cette stratégie a parfaitement fonctionné et des périodes d'au moins 6 jours ont pu être retenues là où la norme recommande un minimum de 3 – voir figure 10 (A) et (B). Dans le cas de HEAD et EUROPE, les graphiques permettent d'apprécier la stabilité du profil de température intérieure et les conditions thermiques similaires à la fin et au début de l'expérience de part et d'autre de l'élément.

HEAD-TV et TG

Dans le cas de HEAD et EUROPE, les graphiques permettent d'apprécier la stabilité du profil de température intérieure et les conditions thermiques similaires à la fin et au début de l'expérience de part et d'autre de l'élément.

Pour HEAD-TV et HEAD-TG, les valeurs U sont respectivement de 0.132 et de 0.139 W/m²K – voir figure 11 et 12. Leurs fiabilités sont confirmées par la méthode 2 présentée dans les paragraphes précédents. La méthode 3 n'a pas pu être appliquée en l'absence de mesure des températures de surface pour cet échantillon de données. Les résultats sont également cohérents vis-à-vis des valeurs de calcul théorique – entre 0.130 et 0.138 pour HEAD-TV (selon le λ considéré pour la couche de substrat – voir tableau 4) et de 0.138 W/m²K pour HEAD-TG – voir tableau 4.

EUROPE

Pour EUROPE, la valeur U obtenue par la méthode 1 est de 0.354 W/m²K – voir figure 13. Sa fiabilité est confirmée par la méthode 2. On obtient 0.337 W/m²K avec la méthode 3. En l'absence de détails précis concernant cet objet d'étude, plus particulièrement concernant l'épaisseur de la dalle en béton et de l'isolation ainsi que les caractéristiques thermiques de la couche de drainage – en billes d'argile, la mesure ne peut pas être comparée à la valeur théorique mais elle est cohérente avec la valeur limite SIA 380/1 1988 [17] de 0.4 W/m²K en vigueur à l'époque de la construction du bâtiment.

PETITSENN

Pour PETITSENN, les valeurs enregistrées correspondent à la période avant les vacances de février lorsque les locaux sont occupés du aux aléas de la prise de mesure in situ et à l'autonomie des instruments. Dans ce cas, les résultats sont obtenus sur la base d'un signal mesuré dans des ambiances thermiques relativement instables – voir figure 10 (C). Cependant, l'analyse effectuée sur une période de plus de 20 jours montre que la valeur de convergence est très stable et semble donc fiable – voir figure 14.

La valeur U obtenue par la méthode 1 est de 0.324 W/m²K – voir figure 14. Sa fiabilité est confirmée par la méthode 2. On obtient 0.337 W/m²K avec la méthode 3. Elle est de plus cohérente avec la valeur théorique calculée sur la base des plans et de la visite sur place.

HUG-UP

La sélection des échantillons pour la toiture HUGUP a été plus délicate dans le sens où les espaces situées en dessous correspondent à la salle d'attente des urgences pédiatriques et qu'il n'y a dans ce contexte aucune régularité dans les fréquences d'occupation – voir figure 10 (D). Le traitement a révélé qu'en effet les données ne sont pas exploitables dans ce contexte pour l'obtention d'une valeur acceptable et analysable dans le cadre de cette étude – voir figure 15.

Incertitude

La précision du mesurage dépend de plusieurs facteurs qui sont listés dans le tableau ci-dessous. Chacun d'entre eux représente un certain pourcentage d'erreur. En réalisant la somme quadratique – respectivement la somme arithmétique, de ces erreurs, on obtient l'incertitude moyenne – respectivement l'incertitude maximale.

Tableau 5 : Liste des facteurs pris en compte pour le calcul de l'incertitude type et maximale.

Fluxmètre	3.4%	La plupart des fluxmètres sortant d'usine, on peut considérer qu'ils sont bien étalonnés.
Thermocouple intérieur	0.4%	Documentation des TC type K
Thermocouple extérieur	0.4%	
Datalogger	0.1%	Documentation Campbell Scientific
Contact thermique	5%	Norme ISO 9869
Erreur opérationnelle	3 %	Norme ISO 9869
Erreurs causées par la variation de températures et de flux thermique	10 %	Norme ISO 9869
Mesure du coefficient de	5 %	Norme ISO 9869
Incertitude type – somme quadratique		13%
Incertitude maximale – somme arithmétique		27%

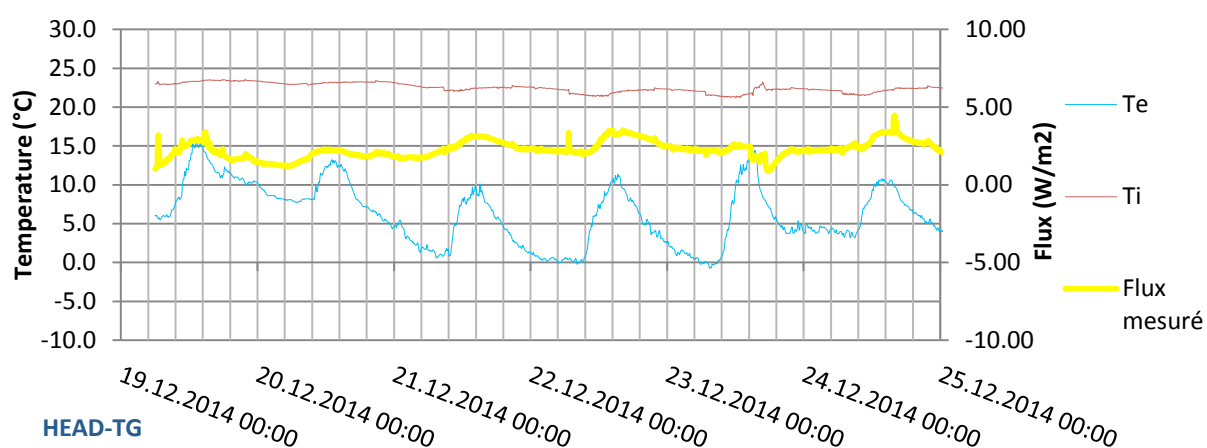
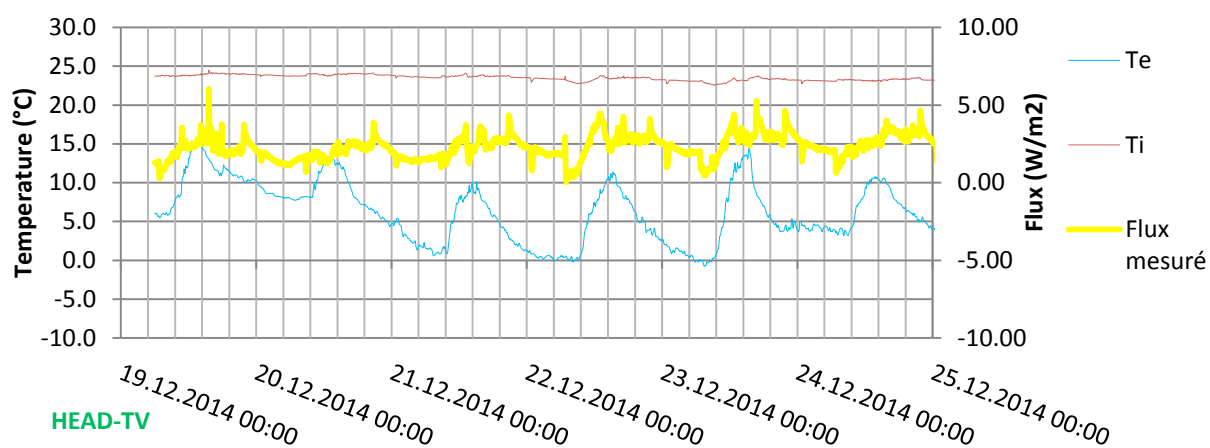


Figure 10 (A) : HIVER – Graphiques des données enregistrées sur les points de mesure HEAD-TV et HEAD-TG retenues pour le calcul de la valeur U.

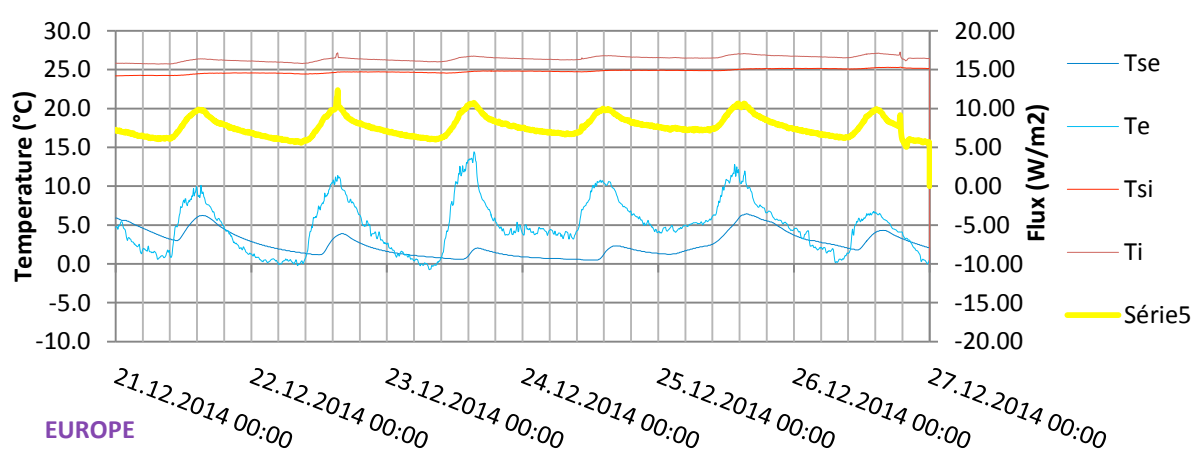


Figure 10 (B) : HIVER – Graphiques des données enregistrées sur les points de EUROPE retenues pour le calcul de la valeur U.

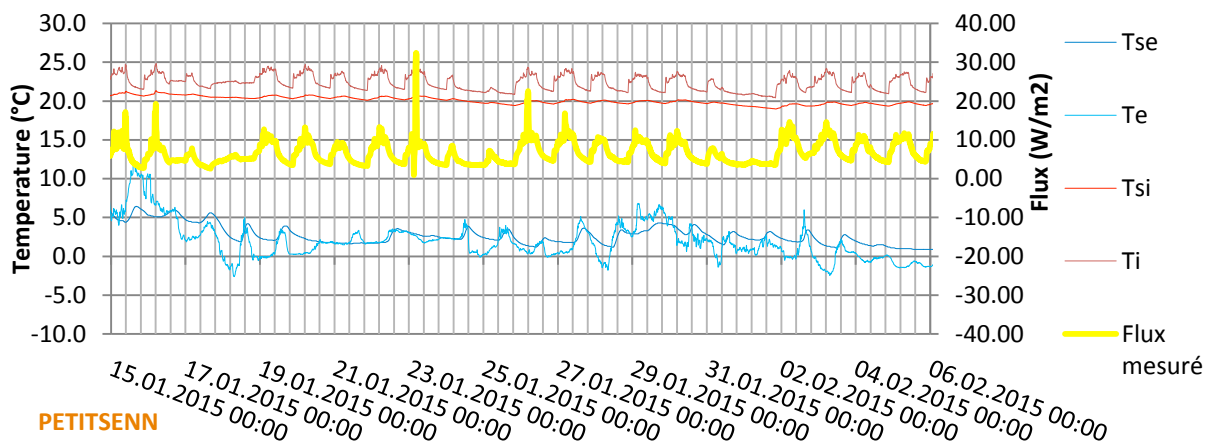


Figure 10 (C) : HIVER – Graphiques des données enregistrées sur les points de PETITSENN retenues pour le calcul de la valeur U.

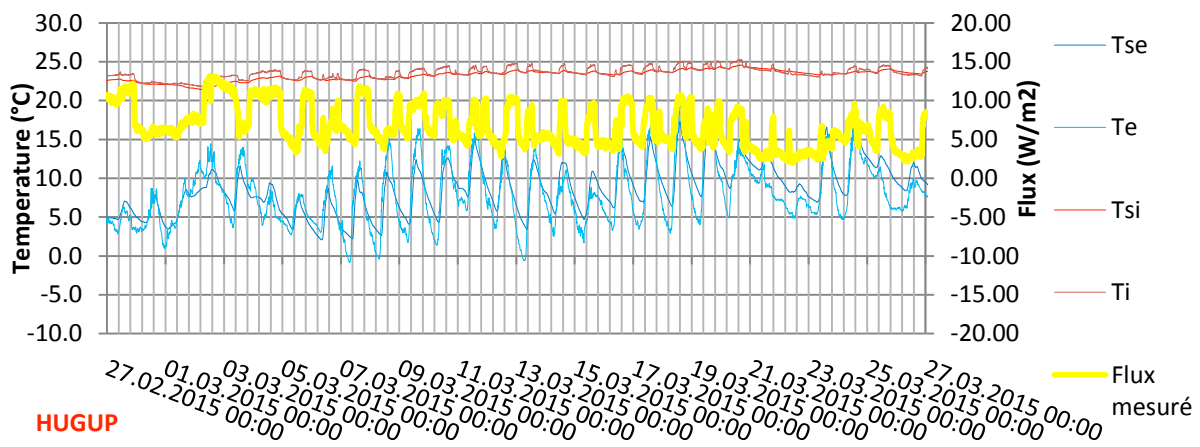


Figure 10 (D) : HIVER – Graphiques des données enregistrées sur les points de HUGUP non retenues pour le calcul de la valeur U.

HEAD-TV - Performance thermique - Valeur U
Convergence par la méthode de la moyenne
19.12.2014 8:00 - 25.12.2014 8:00

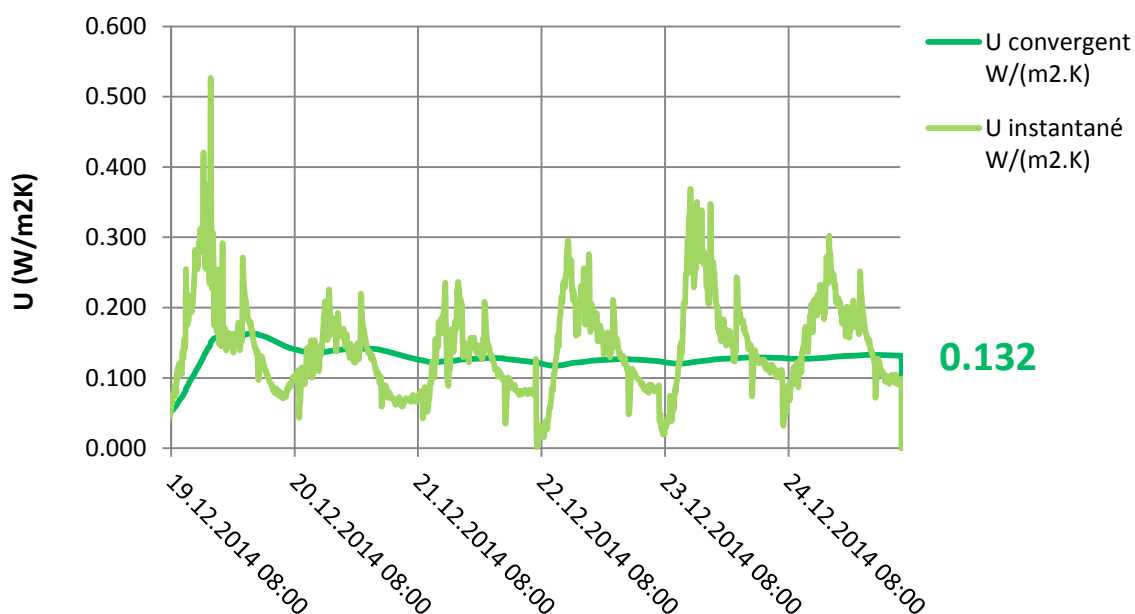


Figure 11: HEAD-TV_ Valeur U- Convergence par la méthode de la moyenne.

HEAD-TG - Performance thermique - Valeur U
Convergence par la méthode de la moyenne
19.12.2014 8:00 - 25.12.2014 8:00

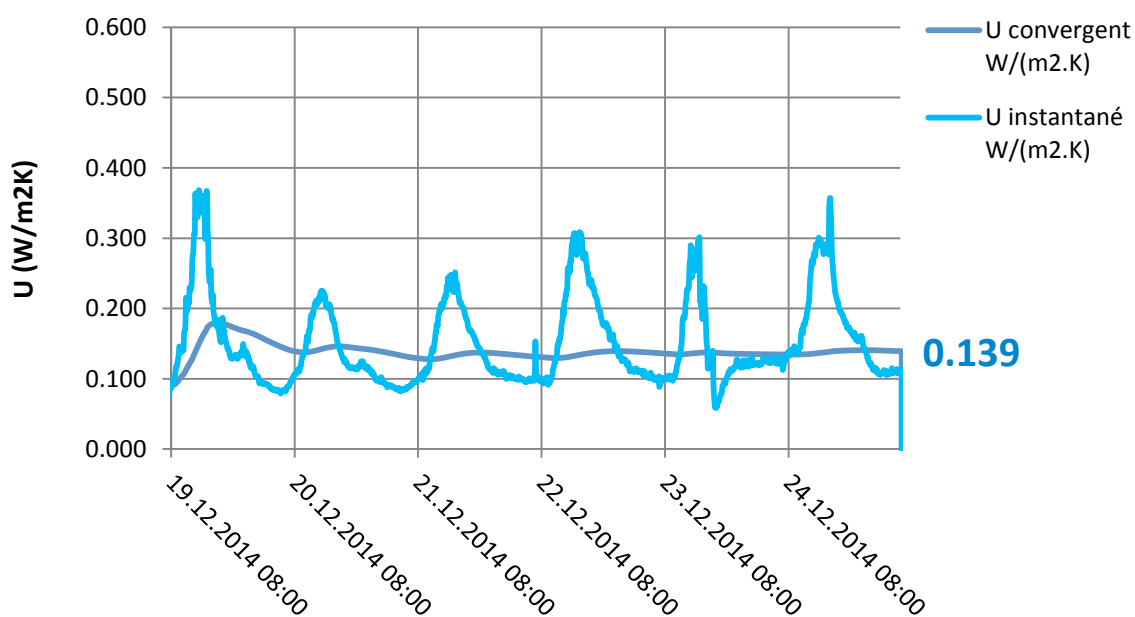


Figure 12: HEAD-TG_ Valeur U - Convergence par la méthode de la moyenne.

EUROPE - Performance thermique - Valeur U
Convergence par la méthode de la moyenne
21.12.2014 0:00 - 27.12.2014 0:00

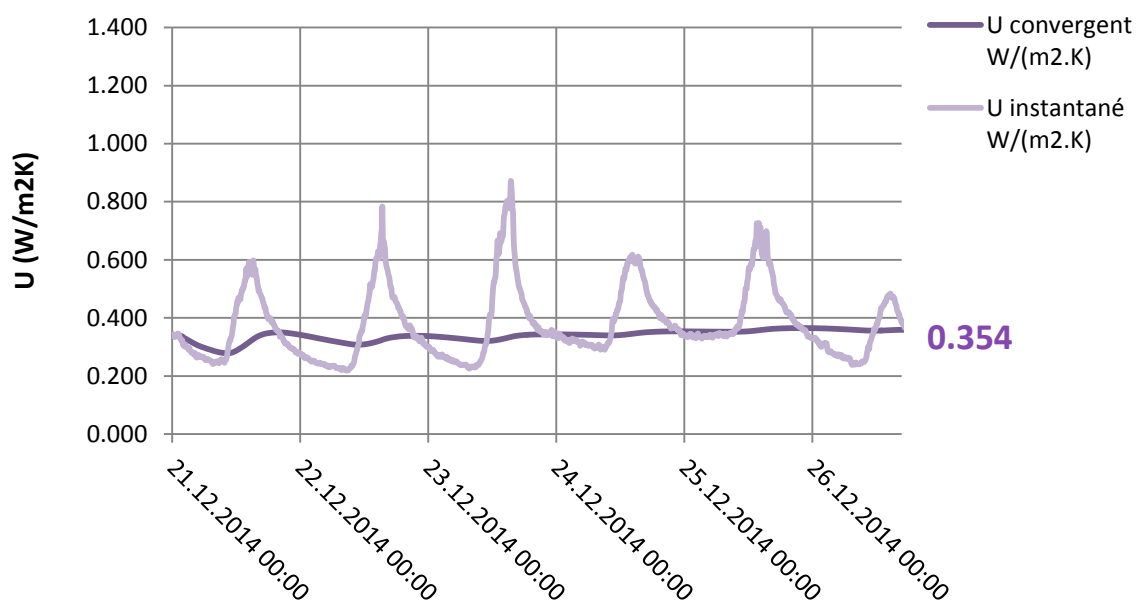


Figure 13: EUROPE_Valeur U - Convergence par la méthode de la moyenne.

PETITSENN - Performance thermique - Valeur U
Convergence par la méthode de la moyenne
15.01.2015 00:00 - 07.02.2015 00:00

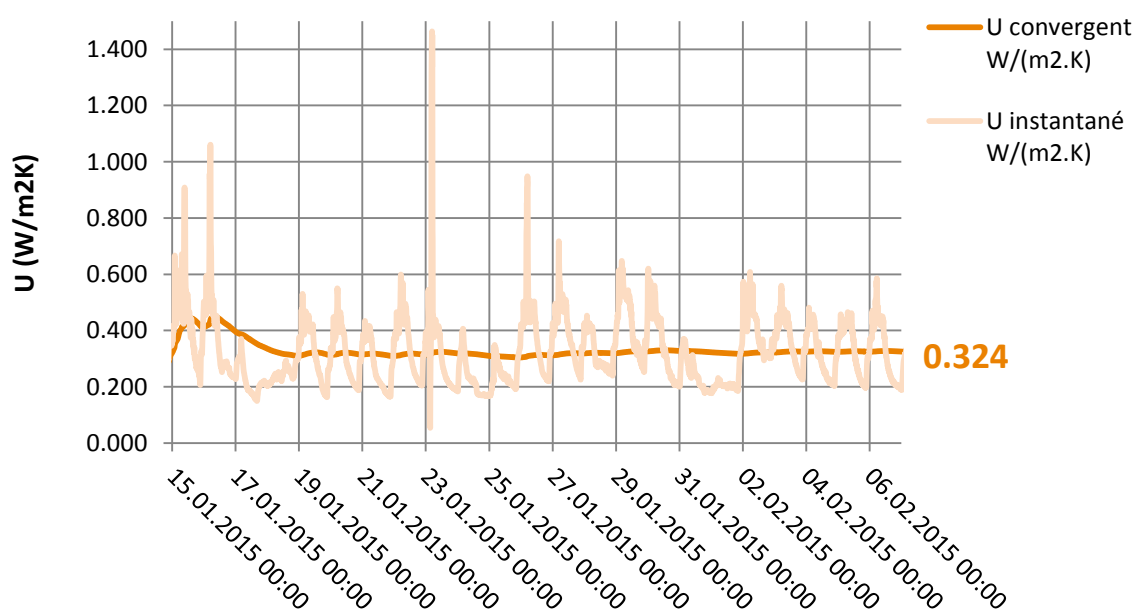


Figure 14: PETITSENN_Valeur U - Convergence par la méthode de la moyenne.

HUGUP - Performance thermique - Valeur U
Convergence par la méthode de la moyenne
27.02.2015 00:00 - 27.03.2015 00:00

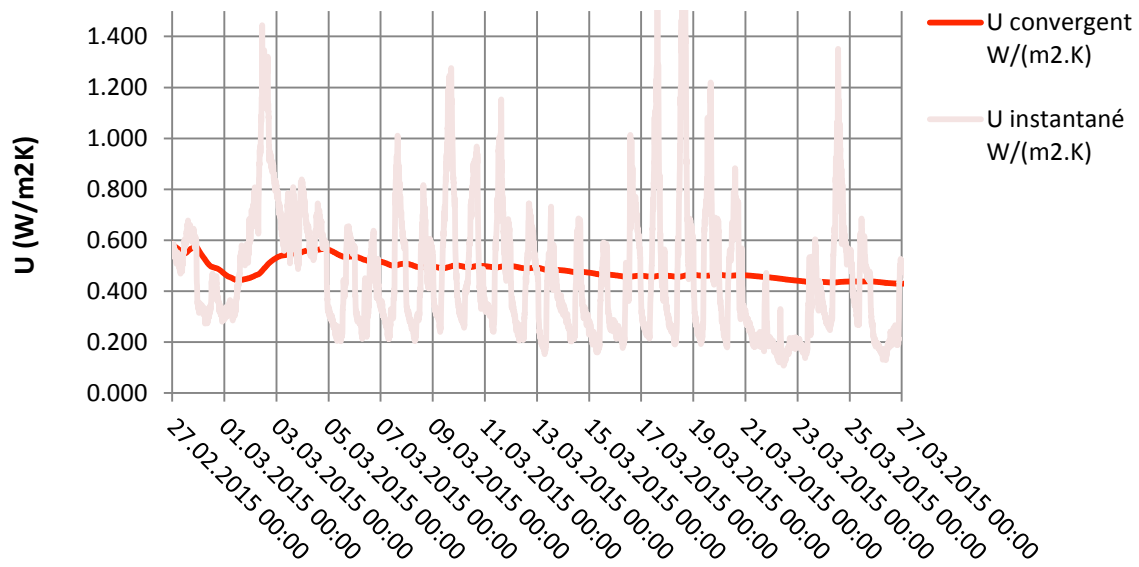


Figure 15: HUGUP _Valeur U - Convergence par la méthode de la moyenne.

SYNTHESE

Les analyses ont permis d'extraire plusieurs valeurs qui caractérisent au niveau thermique les toitures à l'étude – voir tableau 22. En comparant les résultats pour HEAD-TV et HEAD-TG, on note qu'il n'existe pas d'amélioration nette de la performance thermique de l'élément de construction. Le faible écart concernant la valeur U mesuré ne peut être considéré comme un apport conséquent en termes de résistance thermique, particulièrement dans le cas des mesures et de l'incertitude qui doit être considéré – voir paragraphes précédents.

Tableau 22: Performances thermiques des TV – Tableau de synthèse.

	HEAD-TV	HEAD-TG	EUROPE	PETITSENN
U calculé selon lambdas théoriques considérés – voir tableau 4	0.130 - 0.138	0.138	-	0.270 - 0.330
U li projet ou norme	0.16 (Projet)	0.16 (Projet)	0.40 SIA 380/1 1988 [17]	0.40 SIA 380/1 1988 [17]
Année de construction	2010	2010	1996	1992
Isolation	26	26	10	10
Substrat	10	10	10	15
U mesuré – Méthode 1	0.132	0.139	0.354	0.324
Méthode 2 validée	Oui	Oui	Oui	Oui
U mesuré – Méthode 3	-	-	0.337	0.345

L'hypothèse 1, qui consiste à affirmer que les TV permettent de limiter les déperditions thermiques en hiver, ne peut donc pas être validée dans le cadre de cette expérience et confirme les points de nuance mis en évidence dans la revue de littérature. Le substrat végétalisé ne peut pas et ne doit pas être considéré comme une couche supplémentaire d'isolation thermique, particulièrement dans le contexte actuelle de mise en œuvre d'isolation thermique performante dans les éléments de construction, toitures plates incluses.

ÉTÉ

Pour étudier l'impact du substrat végétalisé sur le comportement thermique des toitures en période estivale, les mesures réalisées au niveau de HEAD-TG et de HEAD-TV ont été comparées. Pour la sélection de l'échantillon d'analyse, une série de données pendant la période des vacances scolaires d'été 2015 - où les espaces intérieurs sont potentiellement moins utilisés - a été retenue – du 5 juillet 2015 au 26 août 2015. Cette série de données a de plus l'avantage d'avoir été mesurée pendant une période de canicule sur Genève avec des pics de températures extérieures élevées.

Sur cet échantillon, on observe un décalage temporel entre les profils de températures de surfaces intérieures – Tsi - et de flux thermiques - q. Autrement dit, les pics journaliers de Tsi et de q enregistrés au niveau de HEAD-TG se produisent avant ceux enregistrés au niveau de HEAD-TV – voir figure 16.

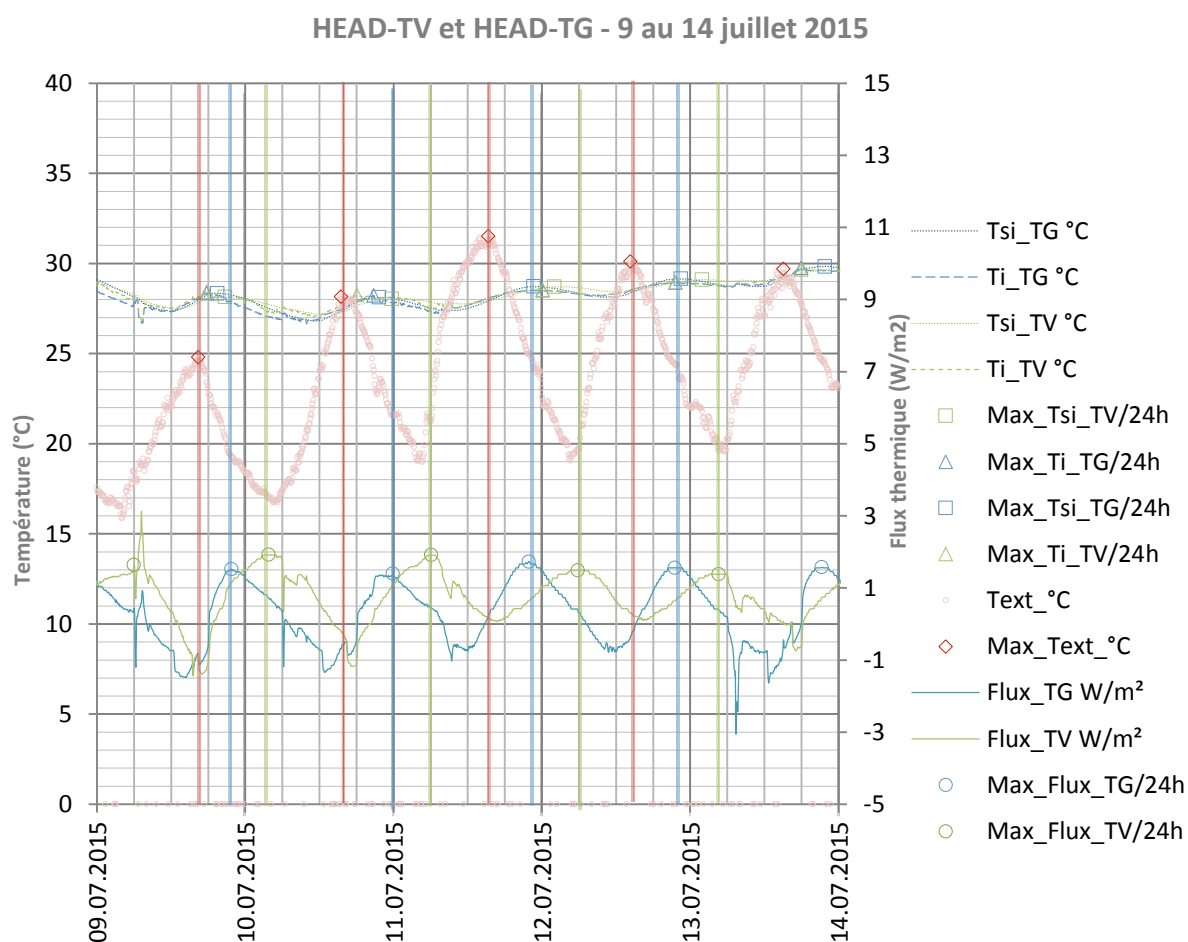


Figure 16: Flux thermique et températures - Juillet-Aout 2015 - HEAD-TV vs HEAD-TG.

Analyse

La tendance observée sur les mesures effectuées dans le bâtiment de la HEAD ne permet cependant pas de procéder à une analyse détaillée. Les valeurs quantitatives - notamment au niveau des temps de décalage - ne peuvent pas être validés scientifiquement dans le contexte de cet environnement de mesure perturbé. En effet, malgré une diminution de l'occupation des locaux, les perturbations liées à d'autres sources comme les installations techniques du bâtiment, sur lesquelles nous n'avons pas pu interagir, rendent délicates l'interprétation des résultats. Dans ce sens, il n'est pas possible de réellement qualifier et quantifier l'impact sur le climat intérieur.

Synthèse

En conclusion, il n'est pas possible de se prononcer quant à l'hypothèse 2 concernant la mise en œuvre de TV pour limiter les surchauffes estivales à l'intérieur des bâtiments. Des expériences complémentaires sur la base du même protocole mais dans le contexte d'un environnement d'étude stable et maîtrisable seraient une piste d'investigation pour traiter plus en détails cette hypothèse.

2.3.3. Mesure de température de l'air ambiant

2.3.3.1. Expérience et protocole

Afin d'évaluer l'évolution et la distribution des températures au-dessus des toitures, deux stations de mesure – station Rotro, ont été montées – voir figure 17. Elles permettent de mesurer en continue la température à 3 hauteurs différentes, 50, 100 et 150 cm. Pour cela des sondes Rotronic Hygroclip2 HC2-S(3)* montées dans des abris climatiques et connectées à des acquiiseurs Rotronic HC2* ont été installés sur des mâts. Une valeur par heure est enregistrée. Les valeurs de vitesse du vent mesurées au niveau de la station Climacity de la Prairie²⁴ ont été considérées dans le cadre de cette expérience.

Durant la période allant du 30 juin au 17 août 2015 – période effective de canicule à Genève, les deux stations Rotro ont été respectivement installées sur la toiture de la HEAD et sur la toiture gravier – type TS-1, du bâtiment B d'hepia – voir figure 18. Ces deux toitures sont exposées à des conditions météorologiques relativement comparables du point de vue du rayonnement solaire et du vent.



Figure 17 : Stations de mesure des températures de l'air en été vues depuis la toiture gravier et repérage des emplacements sur plan. Source du plan : sitg.ch

²⁴ www.climacity.ch

2.3.3.2. Profils verticales de températures comparées

L'évolution des températures en fonction du temps au niveau de chaque point de mesure montre que les profils sont relativement similaires. Il existe de légères différences et une tendance non généralisable à l'apparition de pics journaliers de températures faiblement plus élevés au niveau de la TG que de la TV – voir figure 18. Les moyennes journalières suivent également cette tendance. Cependant, les écarts restent négligeables pour affirmer qu'il existe une atténuation des températures au-dessus de la TV par rapport à la TG.

Précision de mesurage de ²⁵ +/- 0.1°C	Différence des pics journaliers			Différence des moyennes journalières		
	T50	T100	T150	T50	T100	T150
Minimum (°C)	-0.9	-0.4	-0.7	-0.3	-0.1	-0.1
Moyenne (°C)	0.2	0.5	0.2	0.5	0.6	0.4
Maximum (°C)	1.5	1.6	1.5	0.1	0.2	0.1

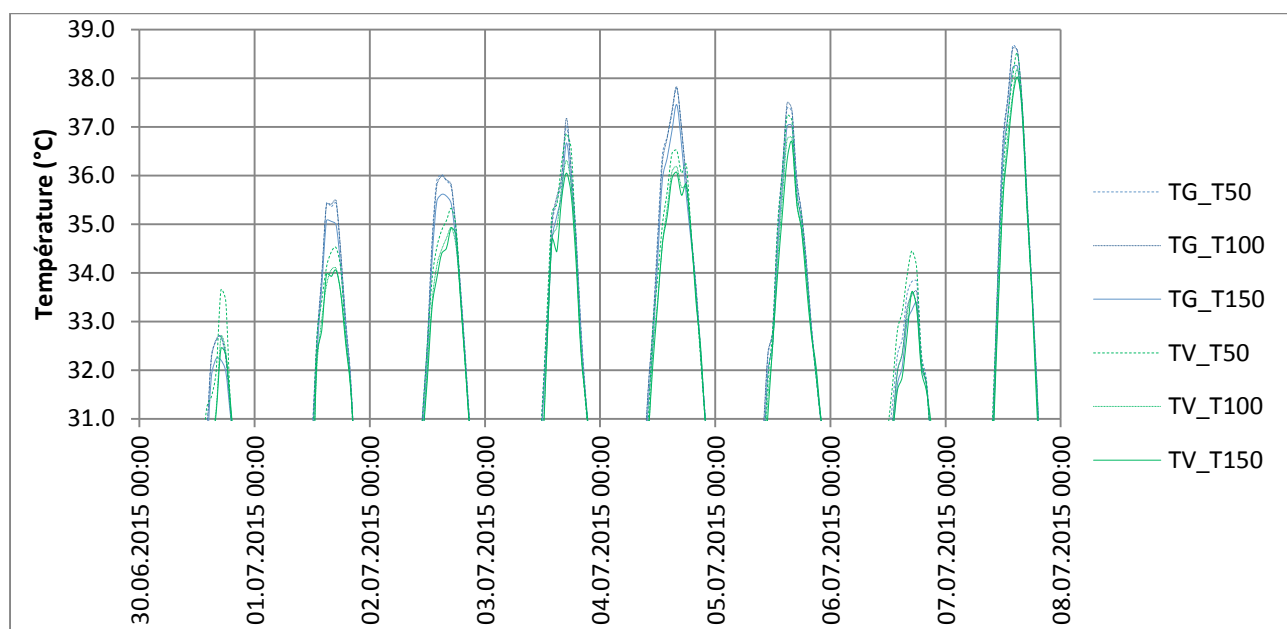


Figure 18 : Tableau des résultats et graphique de l'évolution des températures – zoom sur la période caractéristique du 30.06.2015 au 10.07.2015.

L'analyse statistique des données confirme cette distribution relativement similaire des températures au niveau des six points de mesure – voir figure 19. La distribution des différences entre les températures mesurées à la même hauteur sur la TV et sur la TG appuie cette tendance avec des valeurs médianes légèrement supérieures à 0.

D'autres séries ont également été étudiées : des filtres ont été appliqués afin d'analyser séparément les valeurs de jour et celles de nuits et également afin d'isoler les mesures lors de vent modéré – les valeurs de

²⁵ www.rottronic.ch - <http://uk.rs-online.com/web/p/thermohygrometer-accessories/7259527/>

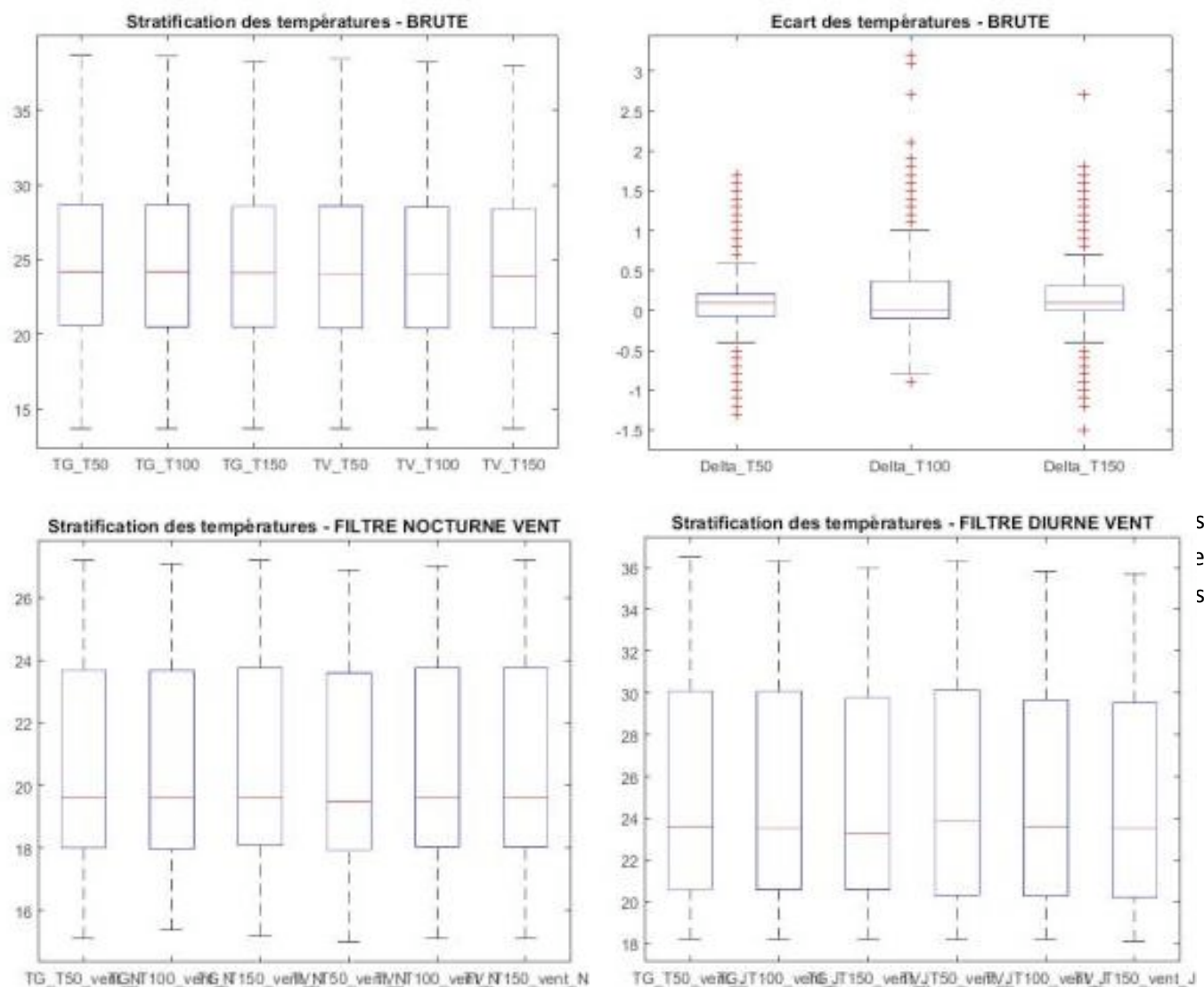


Figure 19 : *Boxplots* représentant la distribution des températures mesurées du 20 mai au 18 aout 2015 à 50, 100 et 150 cm au-dessus de la TG et à 50, 100 et 150 cm au-dessus de la TV HEAD (en haut, à gauche) , différences entre les températures mesurées à la même hauteur – 50, 100 et 150 cm, sur la TV et sur la TG (en haut, à droite), les températures avec application de filtres diurne (en bas, à gauche) et nocturne (en bas, à droite) pour une vitesse de vent maximum (2m/s).

L'hypothèse 3 qui traite du phénomène de rafraichissement de l'environnement proche du à la présence d'une TV ne peut donc pas être validé dans le cadre de cette expérience effectuée sur une période de fortes températures à Genève.

C'est le phénomène d'ET qui permet en théorie de limiter le flux de chaleur sensible et l'augmentation des températures au-dessus des TV. Or les mesures parallèles effectuées par le groupe « Substrat et Hydrologie » confirment l'absence d'eau dans le substrat pour cette période. Les valeurs d'ET réelle calculées ponctuellement sur plusieurs journées à l'été 2015 sont très faibles – voir rapport « Substrat et hydrologie ». Ceci pourrait expliquer les résultats obtenus et confirmer la remarque mise en avant dans la revue de littérature concernant la nécessité de bénéficier d'un stock d'eau suffisant dans le substrat pour que le phénomène d'ET soit significatif.

PARTIE 3 : CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Dans cette étude, il était proposé d'évaluer l'impact des toitures végétalisées sur la qualité thermique des bâtiments et sur le micro climat local. Dans ce contexte, plusieurs TV ont été étudiées sur le canton de Genève autour de trois axes d'investigation. Cette conclusion résume les résultats obtenus et propose des recommandations.

Hiver et déperditions thermiques

Concernant la capacité des TV à réduire les déperditions thermiques par la toiture en hiver, les résultats montrent que cette hypothèse ne semble pas généralisable. En effet, les mesures effectuées sur une toiture végétalisée extensive - HEAD-TV - composé de 10 cm de couche végétale, indiquent que son coefficient de transmission thermique U est très proche de la même toiture recouverte d'une couche de gravier rond - HEAD-TG. Le substrat végétalisé n'a donc qu'un impact faible sur les déperditions thermiques de cet élément.

En conclusion, il semble donc important de ne pas systématiquement considérer le substrat végétalisé des TV comme une couche d'isolation supplémentaire. Dans le contexte actuel de construction/rénovation de bâtiments énergétiquement performant, les performances en termes d'isolation thermique dépendent principalement de l'épaisseur de matériau isolant mis en œuvre.

Confort estival dans les bâtiments

Concernant la capacité des TV à améliorer le confort thermique estival à l'intérieur des bâtiments, les résultats ne permettent pas de se prononcer concrètement sur l'impact des TV sur le climat intérieur.

De façon générale, on retiendra que la forme du bâtiment est un élément essentiel à considérer et qu'on ne devrait dans tous les cas s'intéresser à la mise en œuvre d'une TV que lorsque sa surface représente une fraction suffisante de l'enveloppe thermique du bâtiment.

Ilot de chaleur urbain

Dans cette étude, nous avons mesuré en continu l'albédo d'un couvert végétal de TV – HEAD-TV - sur une période de plusieurs mois en été. Les résultats qui en découlent montrent que les valeurs varient entre 0.12 et 0.24 sur la période de mesure pour une moyenne de 0.19. La capacité de cette surface à absorber de la chaleur par rayonnement n'est donc pas négligeable.

Concernant l'impact de la TV sur le micro climat local, les résultats montrent que, dans le contexte des fortes températures estivales de 2015 et d'un substrat pauvre en eau, les effets de la TV sur la réduction des températures de l'air sont absents. Dans les conditions de l'expérience, il semble que la capacité en termes d'évapotranspiration et de réduction du flux de chaleur sensible soient en effet très limités sur cette période sèche.

En résumé, il paraît donc important de retenir que la mise en œuvre systématique d'une TV ne semble pas représenter une stratégie généralisable pour limiter le réchauffement de l'air. En l'absence d'eau dans le substrat et de phénomène d'évapotranspiration, la diminution du flux de chaleur sensible ne sera de toute évidence pas significative. La mise en place de système d'arrosage pourrait être une solution pour assurer un stock d'eau disponible mais il représente sans équivoque des coûts et des contraintes supplémentaires.

notamment liés à la disponibilité de l'eau. Dans ce sens, d'autres alternatives peuvent être intéressantes à considérer, comme par exemple des revêtements de toiture ayant des albédos élevés.

Finalement, lorsque l'on envisage le recours à une TV sur un bâtiment, il est essentiel de prendre en considération sa situation dans le milieu urbain dans laquelle elle s'incorpore. En effet, au contraire d'arbres dans une rue, une TV à plusieurs mètres au-dessus des piétons a peu de chance d'impacter réellement leur confort thermique. Chaque TV est différente en fonction du substrat et de la végétation qu'elle supporte mais également de l'épaisseur de l'isolation et des caractéristiques du support qui la compose. Il est donc important de chacune les considérer comme des objets spécifiques dans des contextes particuliers et de ne pas généraliser les services qu'elles peuvent ou non apporter.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Norme SIA 312 (2013) Végétalisation de toiture.
- [2] Guyot, Gérard (2013) Climatologie de l'environnement : cours et exercices corrigés. Paris:Dunod.
- [3] Musy, Marjory (2014) Une ville verte : Les rôles du végétal en ville. Versailles :Quae.
- [4] Gras, Raymond (1994) Sols caillouteux et production végétale. Paris :Inra
- [5] Normes européenne NBN B62-002 (2009) Performance thermique des bâtiments.
- [6] Courgey, S. Oliva, J.P. (2010) La conception bioclimatique. Mens :Terre vivante.
- [7] Norme SIA 180 (2014) Protection thermique, protection contre l'humidité et climat intérieur dans les bâtiments.
- [7] Documentation SIA D027 (1989) « Mesure in situ » en énergétique du bâtiment.
- [8] Saadatian et al. (2008) A review of energyaspects of green roofs.
- [9] Liu, K ; Minor, J. (2010) Performance evaluation of an Extensive green roof, city of toronto.
- [11] Köhler et al (2003) Green roofs as a contribution to reduce urban heat islands. Germany.
- [12] CREM (2008) Matériaux réfléchissants et perméables pour contrer les îlots de chaleur urbains. Canada.
- [13] Ngan, Goya (2004) Green Roof Policies: Tools for Encouraging Sustainable Design.
- [14] Service des parcs et domaines de la ville de Lausanne (2014) Toitures végétalisées - Guide de recommandations Pourquoi et comment accueillir la nature sur son toit.
- [15] Norme ISO 9869 (1994) Isolation thermique – Eléments de construction – Mesurage in situ de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique.
- [16] Norme ISO 9869-1 (2014) Thermal insulation – In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance – Part 1 : Heat flow meter method.
- [17] Norme SIA 380/1 (1988) Energie thermique dans le bâtiment.
- [18] Norme SIA 380/1 (2001) Energie thermique dans le bâtiment.
- [19] Zurcher, C. Frank, T. (2014) Physique du bâtiment : construction et énergie. Zurich/Vdlf.
- [20] Norme SIA 381/1 (1980) Caractéristiques des matériaux de construction.
- [21] Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (2006) Crop evapotranspiration : guidelines for computing crop water requirements.