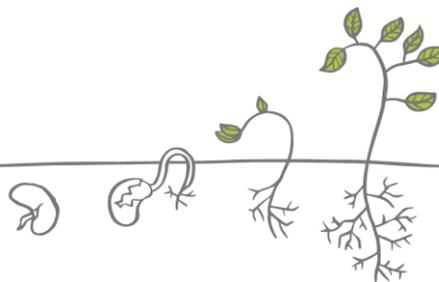


17/02/2016

LA BIODIVERSITE ENTOMOLOGIQUE DES TOITURES VEGETALISEES DU CANTON DE GENEVE

[Fiche de synthèse]



TITRE :

La biodiversité entomologique des toitures végétalisées du canton de Genève - **Rapport final du projet TVEG 2014-2016**

AUTEUR :

Gaël PÉTREMAND, assistant de recherche, Dr Sophie ROCHEFORT, professeur HES et responsable de la filière agronomie

THEMATIQUES :

Agronomie - Sols urbains - Conduite des végétaux, Choix des végétaux et innovation végétale

MOTS-CLES :

Biodiversité, flore, toiture végétalisée, Genève

RESUME :

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.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	0
2	MATÉRIEL & MÉTHODES.....	1
2.1	SITES D'ÉTUDE.....	1
2.2	ECHANTILLONNAGE.....	1
2.2.1	Entomofaune épigée.....	1
2.2.2	Entomofaune aérienne.....	2
2.3	TRI ET DÉTERMINATION.....	3
2.4	ANALYSE ET STATISTIQUES.....	3
3	RÉSULTATS.....	4
3.1	ENTOMOFAUNE ÉPIGÉE.....	4
3.1.1	Arthropodes.....	4
3.1.2	Carabidae.....	8
3.2	ENTOMOFAUNE AÉRIENNE.....	11
3.3	INTERACTIONS ENTRE L'ENTOMOFAUNE, LA VÉGÉTATION ET LE SUBSTRAT.....	12
4	DISCUSSION.....	17
4.1	ARTHROPODES.....	17
4.2	CARABIDAE.....	17
4.3	ENTOMOFAUNE AÉRIENNE.....	18
4.4	INTERACTIONS AVEC LA VÉGÉTATION ET LE SUBSTRAT.....	18

5 CONCLUSION.....	20
BIBLIOGRAPHIE	22
ANNEXE A	24
ANNEXE B	25
ANNEXE C	26
ANNEXE D	27
ANNEXE E	28



Piège « Combi » pour la capture d'insectes aériens sur la toiture végétalisée du collègue de la Seymaz, Genève

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 (Greenlade 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 grands 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-Withney (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'interne 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 épiquée. 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_M0)
 - › 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.

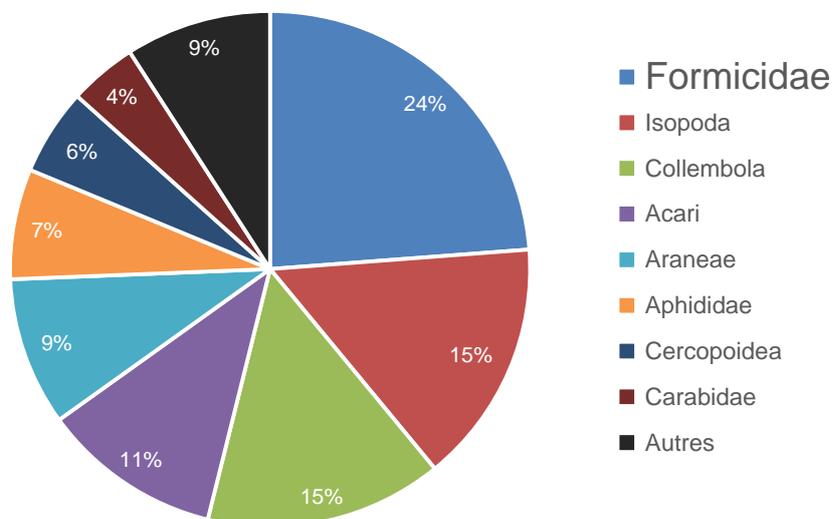


Figure 3. Proportion des principaux groupes d'arthropodes sur les toitures intensives au printemps 2014. Pourcentage calculé à partir du nombre moyen d'individus par piège.

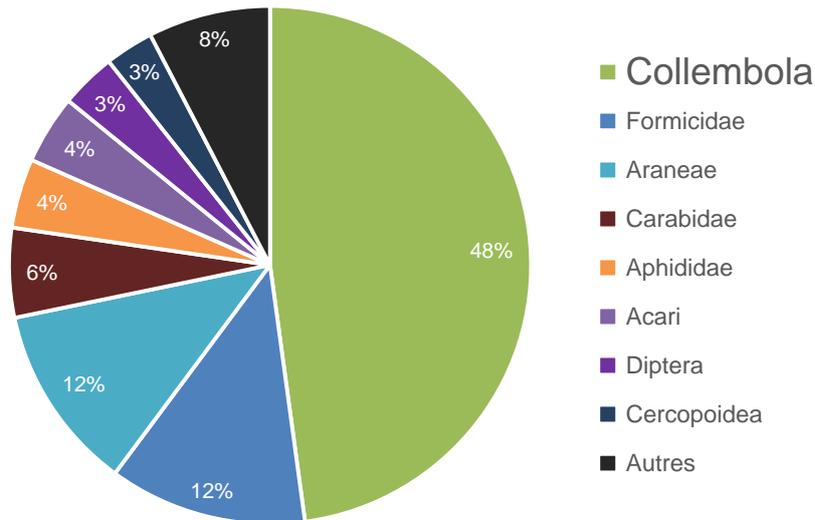


Figure 4. Proportion des principaux groupes d'arthropodes sur les toitures extensives au printemps 2014. Pourcentage calculé à partir du nombre moyen d'individus par piège.

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 appréhensible 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).

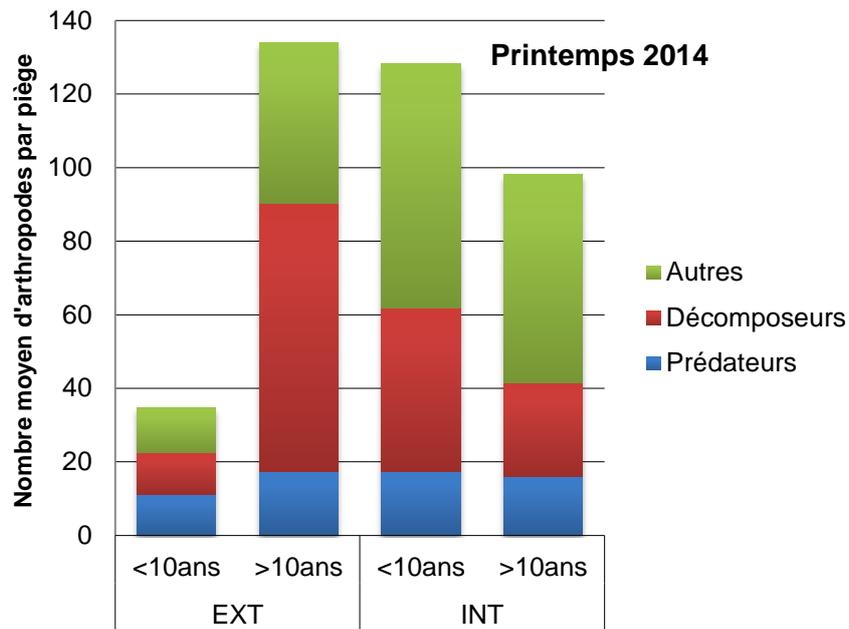


Figure 5. Nombre moyen de prédateurs, de décomposeurs et d'autres arthropodes par piège au printemps 2014.

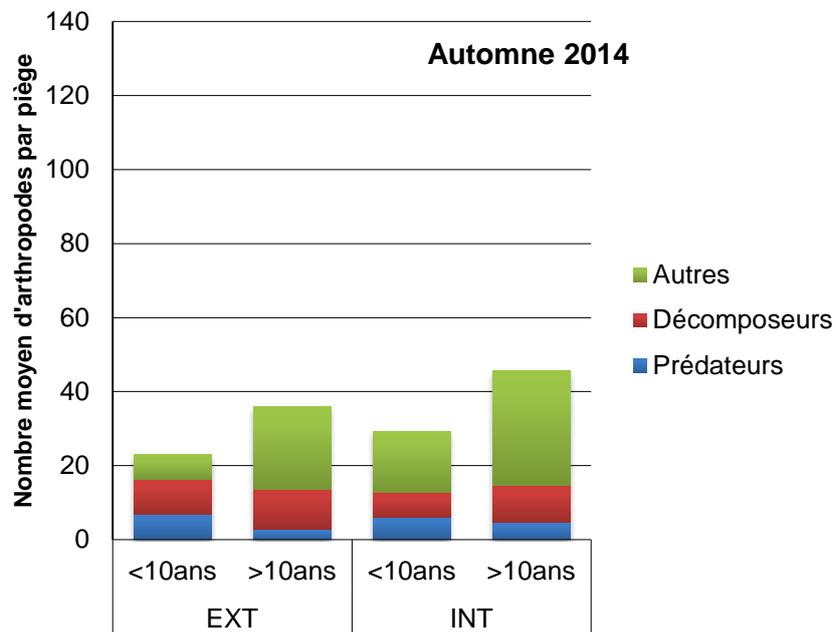


Figure 6. Nombre moyen de prédateurs, de décomposeurs et d'autres arthropodes par piège au printemps 2014.

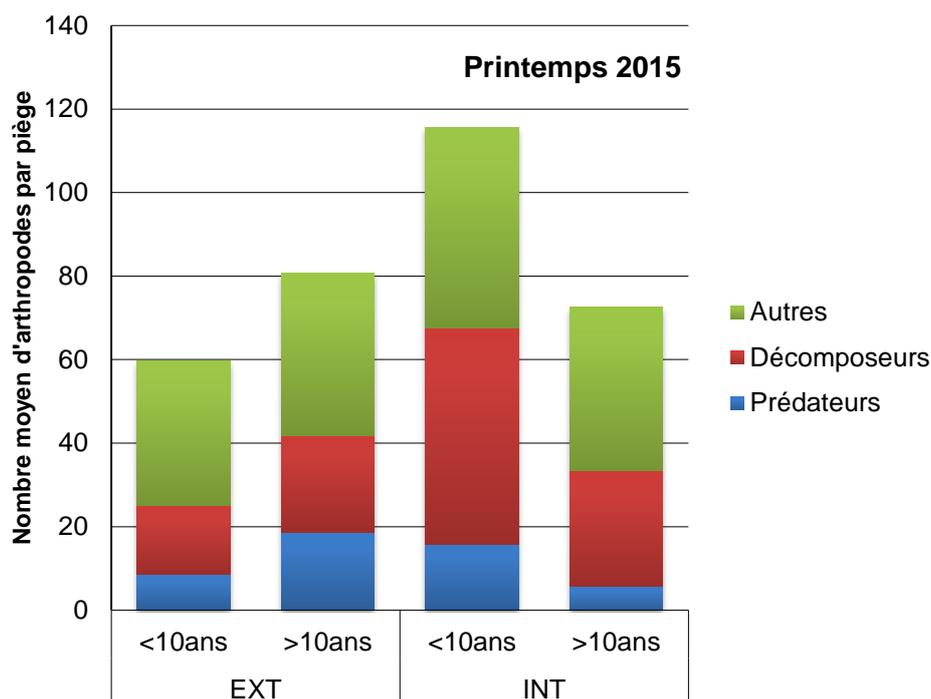


Figure 7. Nombre moyen de prédateurs, de décomposeurs et d'autres arthropodes par piège au printemps 2015.

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.

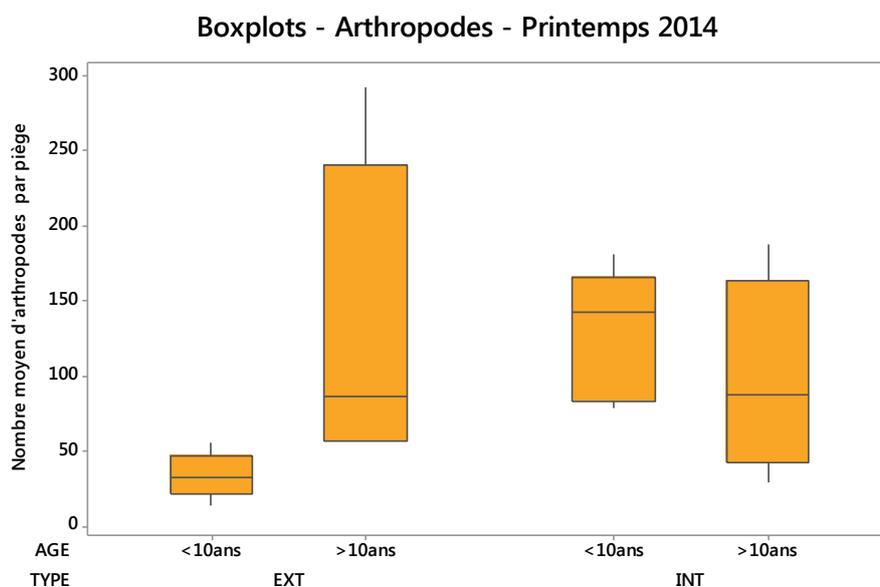


Figure 8 : *Boxplots* du nombre moyen d'arthropodes par piège en fonction du type et de l'âge des toitures au printemps 2014.

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'un 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 steno-xérophile (*Brachinus excludens*), 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.

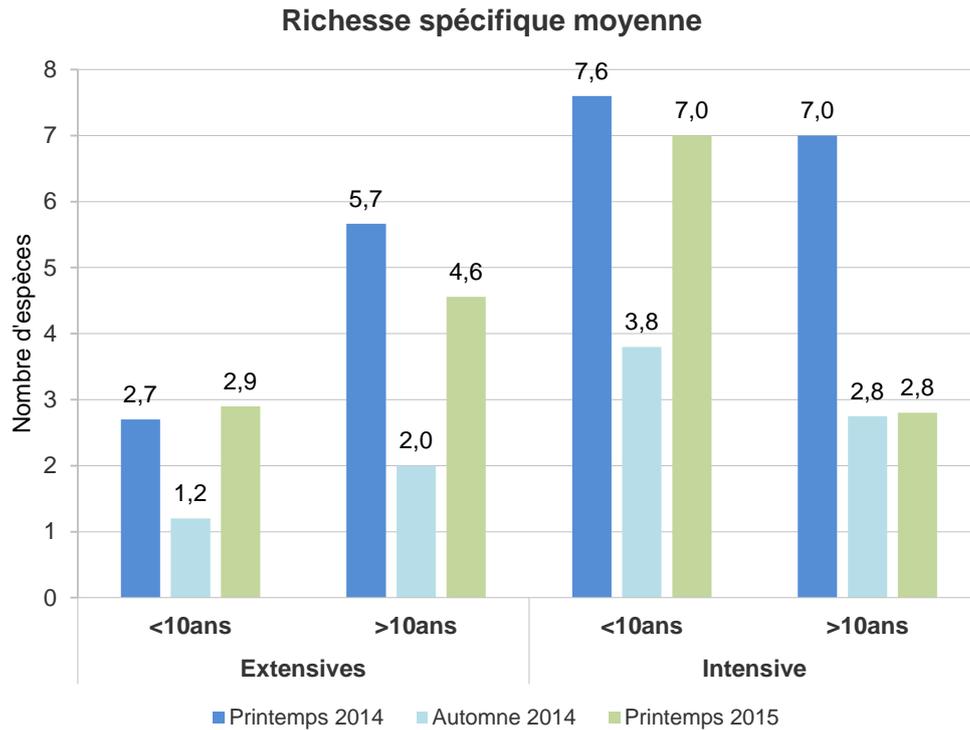


Figure 10. Richesse spécifique moyenne en Carabidae suivant le type et l'âge des toitures pour les trois périodes d'échantillonnage.

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.

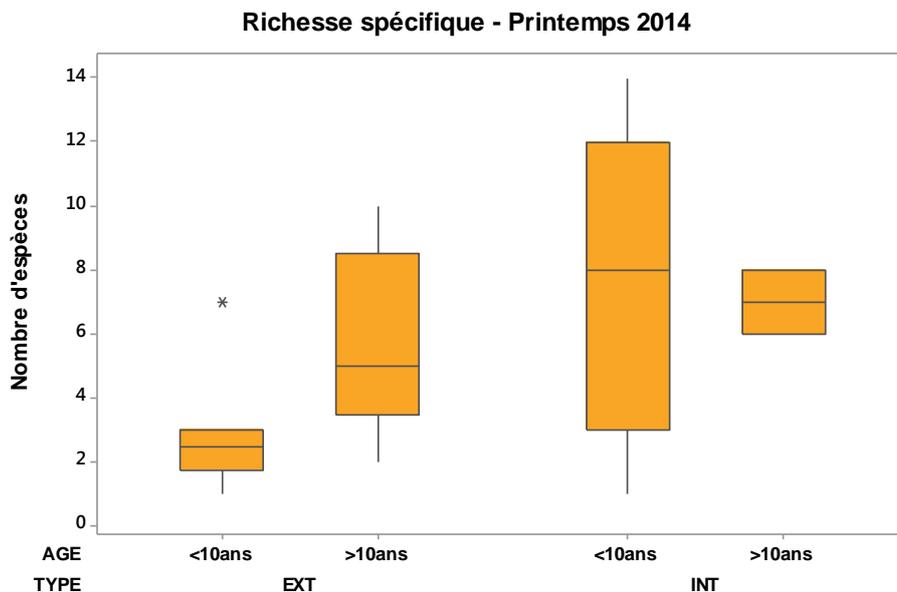


Figure 11. Boxplots de la richesse carabique en fonction du type et de l'âge des toitures au printemps 2014. * = valeur aberrante.

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.

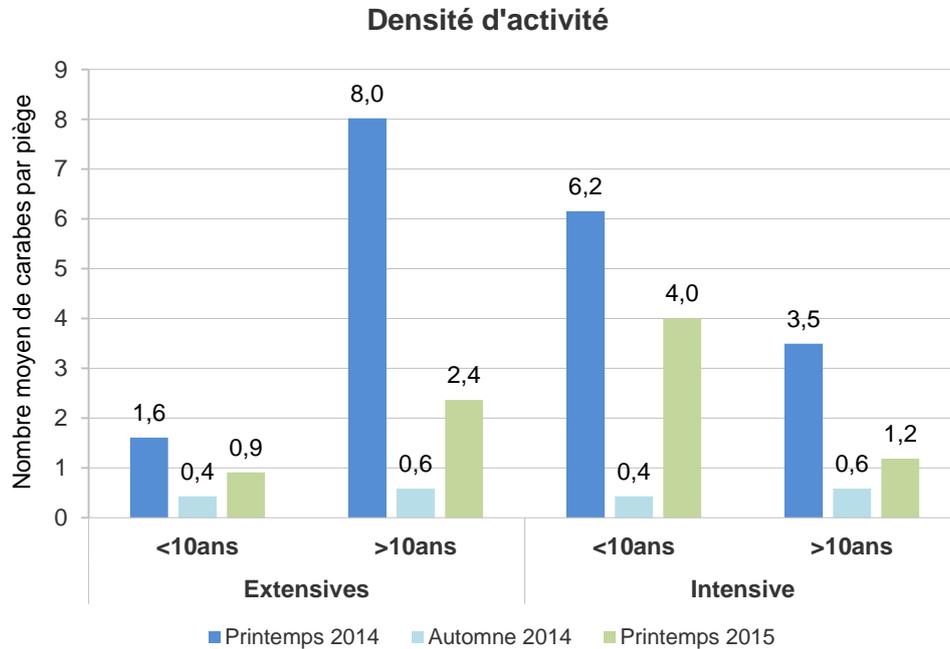


Figure 12. Nombre moyen de Carabidae par piège suivant le type et l'âge des toitures pour les trois périodes d'échantillonnage.

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.

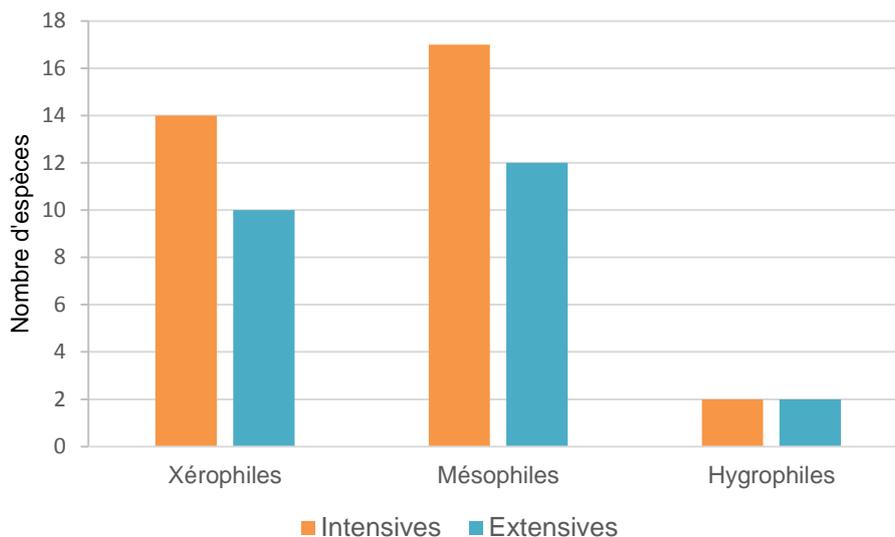


Figure 13. Nombre total moyen d'espèces de carabe par toiture dans chaque type en fonction de leurs préférences en termes d'humidité.

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.

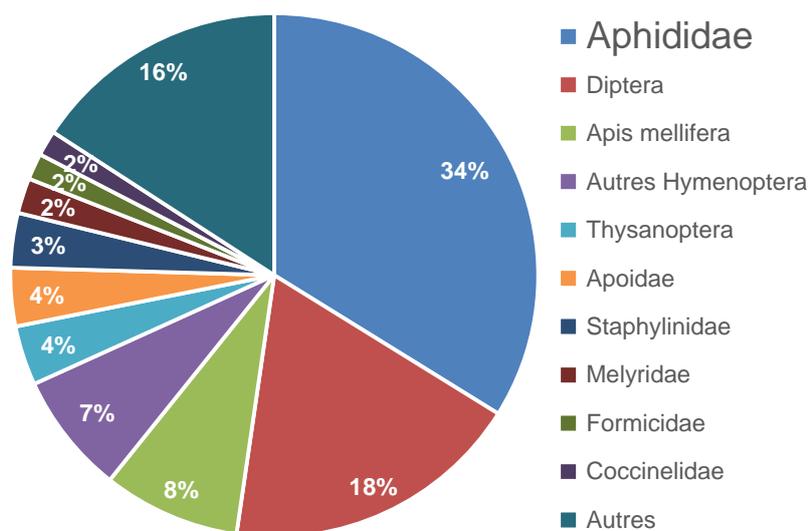


Figure 14. Proportions des principaux taxons identifiés dans les échantillons collectés par les pièges « Combi ».

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 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

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

corrélations 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.

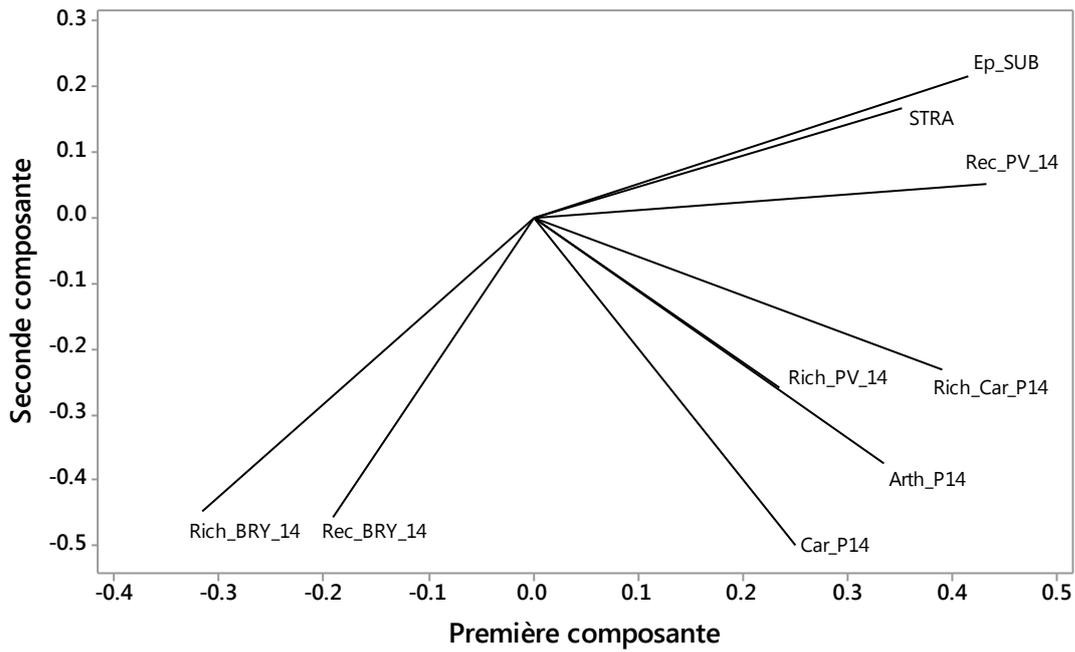
Tableau 2. Coefficients de corrélation des rangs de Spearman de différents paramètres relatifs à l'entomofaune, la végétation et le substrat au printemps 2014. Les valeurs en gras signifient une corrélation significative ($p < 0.05$).

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

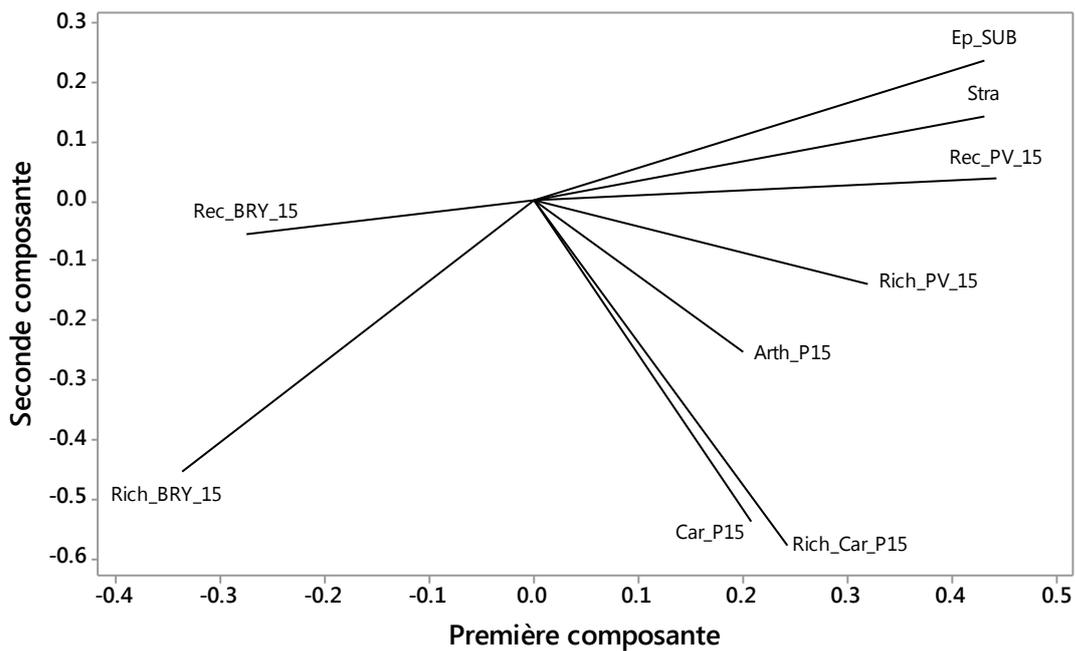
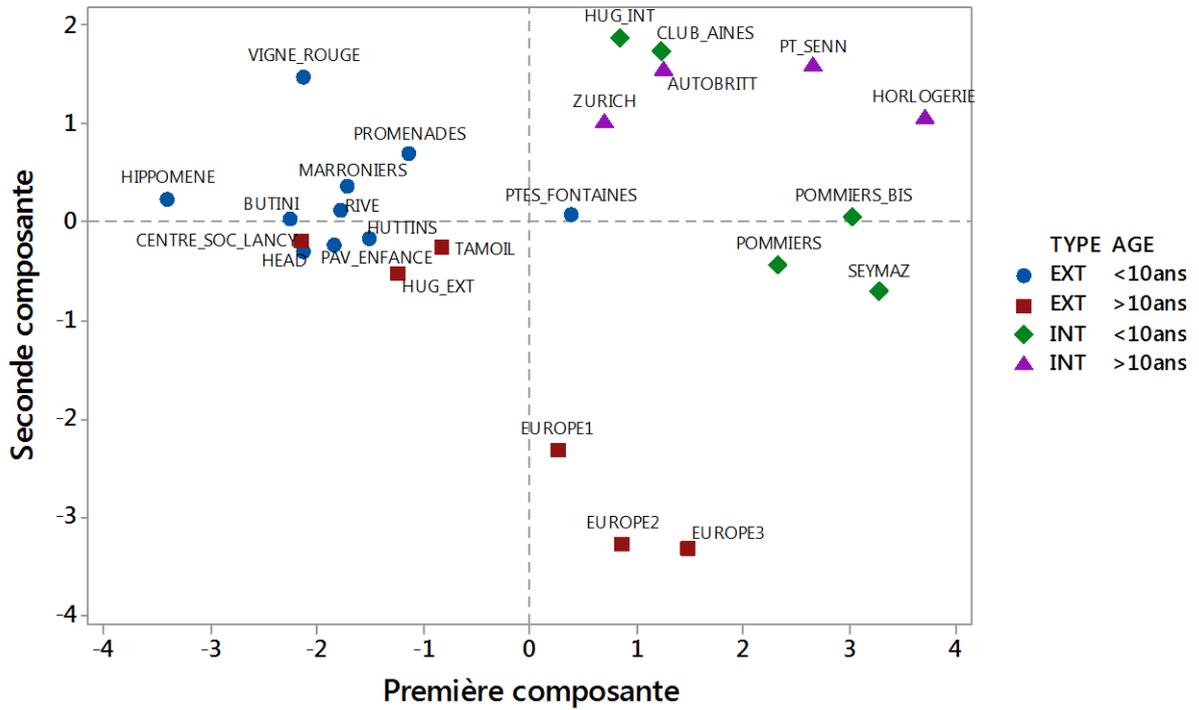


Figure 15. Diagrammes des contributions des variables (paramètres) sur les axes des deux premières composantes principales pour les printemps 2014 et 2015.

Nuages de points - ACP - printemps 2014



Nuage de points - ACP - printemps 2015

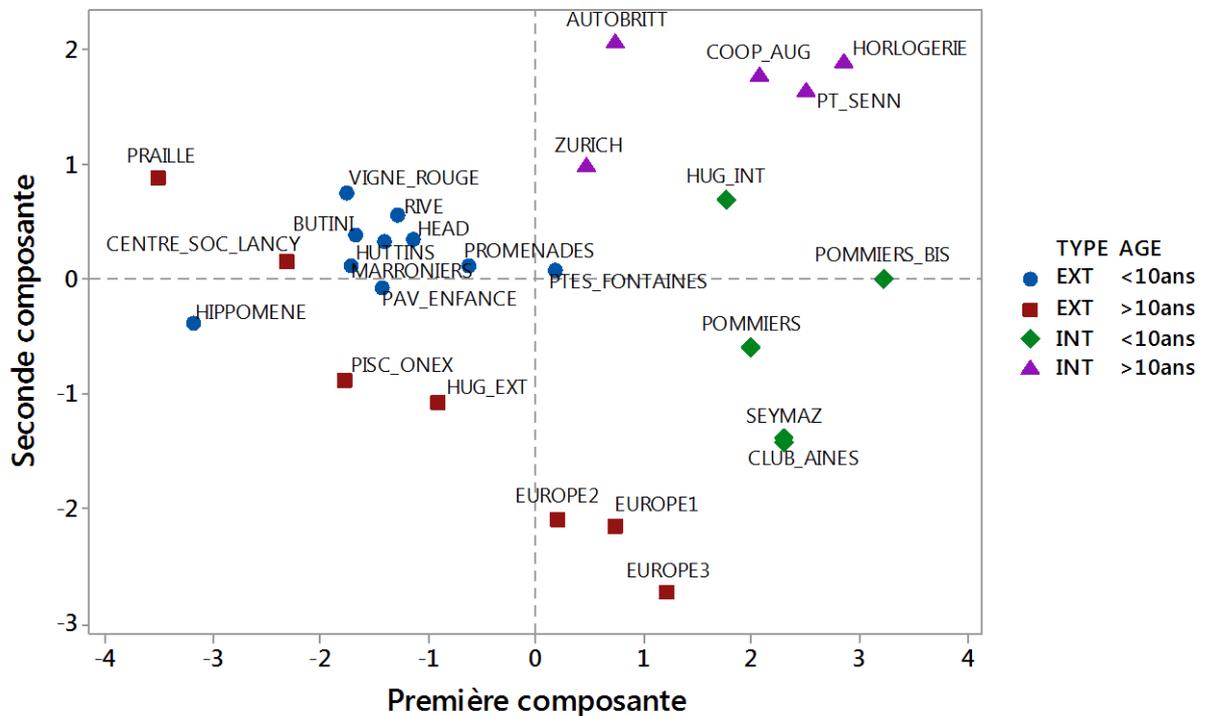


Figure 16. Diagrammes des scores (toitures) sur les axes des deux premières composantes principales pour les printemps 2014 et 2015.

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 (Brenneison 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 Apoidea 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 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 collemboles) 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 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 paraît indispensable pour favoriser au mieux la biodiversité urbaine.

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., Dufrière, 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.

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	Reduvidae
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	Coccinelidae
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

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	Cidadellidae	
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	Scarabidoidea	
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
CARABIDÆ_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
CARABIDÆ_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