

« Diagnostic et promotion de la biodiversité des mares situées sur les toitures urbaines en Suisse »



Travail de Bachelor présenté par :

Rafael DONATH

pour l'obtention du titre Bachelor of Science HES-SO en Gestion de la Nature

Août 2021

Conseiller scientifique et répondant HEPIA :

Beat OERTLI, Dr., Prof.

Responsable de la filière Gestion de la Nature :

Patrice PRUNIER

Déclaration

Ce travail de Bachelor est réalisé dans le cadre de l'examen final de la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève, en vue de l'obtention du titre de Bachelor HES-SO en Gestion de la Nature.

L'étudiant assume la responsabilité du travail et accepte, le cas échéant, la clause de confidentialité. Par contre, les conclusions et les recommandations qu'il y formule, sans préjuger de leur valeur, n'engagent ni les responsabilités de l'auteur, ni celle du répondant HEPIA ni celle du conseiller scientifique, des experts et de HEPIA.

« J'atteste avoir réalisé seul le présent travail, sans avoir utilisé des sources autres que celles citées dans la bibliographie. »

Fait à Genève, le 17 septembre 2021

Rafael DONATH

Photo de couverture : Mare sur toit de Vevey (Vaud), 23 juin 2021, © R. Donath.

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Beat OERTLI, pour sa disponibilité dans l'encadrement de ce travail, pour le temps qu'il m'a accordé, le soutien qu'il m'a apporté et les précieux conseils qu'il m'a donnés.

Je remercie Marine DECREY et Rémy JEANLOZ, pour leur aide dans l'organisation des relevés et pour avoir partagé les informations qu'ils ont recueillies sur les mares dans le cadre du projet MARETOIT, du programme SPARK du FNS.

Je remercie les laborantines d'HEPIA, pour le prêt du matériel nécessaire à mes relevés, et en particulier Eliane DEMIERRE, pour son aide dans la détermination des macroinvertébrés aquatiques.

Je tiens finalement à remercier les propriétaires et les gestionnaires des toitures, pour m'avoir autorisé l'accès aux mares et pour le temps qu'ils m'ont consacré :

- Alex Gemperle (Alex Gemperle AG)
- Anne Kouo (Direction du Patrimoine Bâti de Genève (DPBA))
- Antonio Santangelo (Département de l'Instruction Public de Genève (DIP))
- Bastien Hage (Tech Building SA)
- Beatriz Rodriguez (Société Coopérative d'Habitation Genève (SCHG))
- Cédric Perrin (Ville de Lausanne)
- Chloe Brown (Organisation Internationale du Travail (OIT))
- Francisco Bernardino (SI-REN SA)
- François Laroche (Contec AG)
- Frédéric Roussé (Ville de Lausanne)
- Jasintha Roesy (Cogerim)
- Lionel Guichard (Service des Travaux et de l'Environnement de la municipalité d'Yverdon-les-Bains)
- Markus Rothen (Also Holding AG)
- Montserrat Belmonte (Fondation des Maisons Communales de Vernier (FMCV))
- Mouna Yahaoui (Domicim)
- Natalie Brägger (Migros)
- Pascal Besson
- Thierry Charlier (HIAG Immobilien Schweiz AG)

Résumé

Les milieux aquatiques ont fortement régressé en Suisse, entraînant la raréfaction des espèces qu'ils hébergent. Ce phénomène pourrait être limité par l'aménagement de mares en ville, en particulier sur les toits. Cependant, peu d'études traitent de ce sujet. Ce travail propose donc d'évaluer la contribution à la biodiversité des mares situées sur les toitures urbaines, et de mettre en évidence les bonnes pratiques pour promouvoir cette biodiversité.

Un inventaire de la végétation et des macroinvertébrés aquatiques, ainsi que des amphibiens, a été effectué en juin 2021 dans 37 mares sur toits des grandes villes du Plateau suisse. Les données récoltées confirment la présence de nombreuses espèces aquatiques vivant et se reproduisant dans ces mares. Dix-huit familles de macroinvertébrés aquatiques ont été identifiées, principalement des diptères et des coléoptères ainsi que des odonates, hétéroptères et éphéméroptères. La végétation aquatique n'est présente que dans 20% des mares, et aucun amphibien n'a été relevé. On constate que cette biodiversité est moins élevée que celle des mares au sol. Par ailleurs, les disservices générés sont faibles, avec une seule occurrence de néophyte invasive et peu d'insectes piqueurs.

Ces données ont été corrélées aux différents paramètres environnementaux des mares. Les facteurs favorisant la richesse en macroinvertébrés aquatiques sont la surface de la mare, son régime hydrologique, la pluviométrie, et le recouvrement par la végétation. Par contre, la hauteur du toit et le pH de l'eau ont une influence négative. Les propositions sont donc principalement d'augmenter la surface et la permanence en eau de ces mares, tout en les multipliant et en diversifiant leurs caractéristiques.

Mots clés : Nature en ville, réseau urbain vert et bleu, éco-toit, macroinvertébrés aquatiques, végétation, aménagement, gestion.

Abréviations

Chla	Chlorophylle a
HEPIA	Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève
IBEM	Indice de biodiversité des étangs et mares
LN	Liste noire
LP	Liste prioritaire
LR	Liste rouge
LC	Non menacé
NT	Potentiellement menacé
VU	Vulnérable
POM	Particule de matière organique (particulate organic matter)
POC	Particule de carbone organique (particulate organic carbon)
CPOM	Particule grossière de matière organique (coarse particulate organic matter)
FPOM	Particule fine de matière organique (fine particulate organic matter)
Ptot	Phosphore total
UICN	Union International pour la Conservation de la Nature

Table des matières

Déclaration	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abréviations	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
1. Introduction	1
2. Cadre général	5
2.1. Nature en ville	5
2.2. Mares urbaines	6
2.3. Toitures végétalisées	8
2.4. Mares sur toitures	10
3. Matériel et méthodes	14
3.1. Site d'étude	14
3.2. Démarche méthodologique	17
3.3. Méthodes de collecte des données	18
3.4. Traitement et analyse des données	21
3.5. Limites de la méthode	22
4. Résultats	23
4.1. Végétation aquatique	23
4.2. Macroinvertébrés aquatiques	27
4.3. Autres groupes faunistiques	31
4.4. Paramètres de l'environnement liés à la présence des macroinvertébrés aquatiques	32
4.5. Biodiversité des mares sur toitures comparée à celle des mares au sol urbaines et rurales	37
5. Discussion	40
6. Propositions pour l'aménagement et la gestion de mares sur les toitures ..	43
7. Conclusion	46
7.1. Synthèse	46
7.2. Perspectives	47
8. Sources	48
8.1. Références bibliographiques	48
8.2. Autres sources d'informations	51
ANNEXES	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs clé des paramètres de l'environnement des 37 mares en juin 2021	15
Tableau 2 : Descriptif de la méthode d'inventaire utilisée pour les 37 mares sur toits en juin 2021	18
Tableau 3 : Liste des plantes aquatiques relevées, classées par types de végétation, avec leur statut de menace en Suisse et leur fréquence de présence dans les 37 mares en juin 2021	24
Tableau 4 : Liste des macroinvertébrés aquatiques relevés, classés par familles et groupes taxonomiques, avec leur statut de menace en Suisse et leur fréquence de présence dans les 37 mares en juin 2021	28
Tableau 5 : Répartition des familles de macroinvertébrés aquatiques capturées dans les 10 mares de Saint-Gall situées sur la même toiture le 11 juin 2021	31

Liste des figures

Figure 1 : Mares sur toit de petites tailles, avec en haut la mare Fenic (Genève) de 7 m ² et 15 cm de profondeur moyenne (14 juin 2021), et en bas la mare Gossa6 (Saint-Gall) de 5 m ² et 8 cm de profondeur moyenne (10 juin 2021)	3
Figure 2 : Mares sur toit de grandes tailles, avec en haut la mare Sonnex (Genève) de 750 m ² et 30 cm de profondeur moyenne (21 juin 2021), et en bas la mare BITGE (Genève) de 3550 m ² et 21 cm de profondeur moyenne (22 juin 2021)	4
Figure 3 : Toiture végétalisée extensive reproduisant un milieu xérothermique naturel indigène à Gossau (Saint-Gall), 11 juin 2021	9
Figure 4 : Toiture végétalisée d'Emmen (Lucerne) sur laquelle niche le vanneau huppé (zoom en haut à droite), avec au premier plan la mare AlsoH, 10 juin 2021	12
Figure 5 : Répartition des 37 mares sur toits inventoriées dans plusieurs grandes villes du Plateau suisse en juin 2021	14
Figure 6 : Fréquence de la hauteur du toit par rapport au sol, de la surface, de la profondeur moyenne, de l'alimentation en eau, de la pluviométrie annuelle moyenne, du régime hydrologique, du niveau trophique et du pH moyen des 37 mares en juin 2021	16
Figure 7 : Mare BleuE (Vaud), caractéristique de celles inventoriées, de petite surface (2,5 m ²), de faible profondeur (maximum 10 cm), avec une bâche en plastique, des pentes douces et peu de substrat, 25 juin 2021	17
Figure 8 : Matériel nécessaire au relevé des macroinvertébrés aquatiques, de gauche à droite : bidon d'eau, bac blanc, épuisette, tubes, pissette d'alcool à 70%, cuillères, pinces, feuille de note	19
Figure 9 : Population d' <i>Alopecurus aequalis</i> dans la mare Gossa2 (Saint-Gall), 11 juin 2021	23
Figure 10 : Mare ConcG (Bern) présentant le plus grand nombre d'espèces végétales aquatiques parmi les 37 mares inventoriées en juin 2021	25
Figure 11 : Fréquence de la richesse spécifique en espèces végétales aquatiques dans les 37 mares en juin 2021	26
Figure 12 : Fréquence de présence des différents types de végétation dans les 37 mares en juin 2021	26
Figure 13 : Comparaison du pourcentage de recouvrement végétal entre l'intérieur des 37 mares et leurs zone riveraine (bande de 50 cm de largeur les entourant) en juin 2021	26
Figure 14 : Fréquence de présence des groupes taxonomiques de macroinvertébrés aquatiques capturés dans les 37 mares en juin 2021	29
Figure 15 : Fréquence de présence des Culicidae (moustiques) et Ceratopogonidae capturés dans les 37 mares en juin 2021	29
Figure 16 : Fréquence de la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) capturés dans les 37 mares en juin 2021	29

Figure 17 : Courbe d'accumulation de la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) capturés dans les 10 mares de Saint-Gall situées sur la même toiture le 11 juin 2021	30
Figure 18 : Poissons (carpes) présents dans la mare Sonnex à Genève, 21 juin 2021	131
Figure 19 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction de la surface des 37 mares en juin 2021	33
Figure 20 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction de la profondeur des 37 mares en juin 2021	33
Figure 21 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction du régime hydrologique des 37 mares en juin 2021	33
Figure 22 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction de la couverture végétale des 37 mares en juin 2021.....	34
Figure 23 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction de la hauteur du toit des 37 mares en juin 2021	34
Figure 24 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction de la pluviométrie (moyenne annuelle entre 1980 et 2020) des 37 mares en juin 2021	34
Figure 25 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction du pH de l'eau des 37 mares en juin 2021	35
Figure 26 : Contribution des variables au modèle de régression pas à pas par sélection ascendante liant la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) des 37 mares en juin 2021 aux paramètres de l'environnement avec alpha pour inclure de 0,1.....	36
Figure 27 : Contribution des variables au modèle de régression pas à pas par sélection ascendante liant la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) des 37 mares en juin 2021 aux paramètres de l'environnement avec alpha pour inclure de 0,25.....	36
Figure 28 : Comparaison de la fréquence de présence de différents groupes taxonomiques entre 81 mares au sol genevoises (2012-2013) et les 37 mares sur toits (juin 2021).....	37
Figure 29 : Comparaison de la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) entre les mares au sol de basse altitude (<1000 [m.s.m.]) en Suisse (1996-2005) et les 37 mares sur toits (juin 2021).....	38
Figure 30 : Comparaison de la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction de la surface entre les mares au sol de basse altitude (<1000 [m.s.m.]) en Suisse (1996-2005) et les 37 mares sur toits (juin 2021)	39
Figure 31 : Milieu xérothermique entourant la mare Hive, typique des toitures végétalisées extensives répandues en Suisse, mais hostile aux organismes aquatiques, 21 juin 2021	42
Figure 32 : Mare GemH aménagée avec un bac et de nombreux îlots recouverts de végétation, 10 juin 2021	44

1. Introduction

Au cours des deux derniers siècles, environ 90% des mares et des étangs ont disparus en Suisse, et les zones humides sont en net recul (Office fédéral de l'environnement [OFEV], 2014 ; Tribune de Genève, 2021). Le constat est proche dans la plupart des pays européens et probablement aussi dans tous ceux qualifiés de « développés » à travers le monde (European Pond Conservation Network [EPCN], 2008).

Cette disparition découle de causes anthropiques, accentuées par l'accroissement démographique, qui sont l'intensification de l'agriculture et l'extension et densification des zones urbaines. Elles entraînent la destruction des mares par assèchement des terrains (drainage) et comblement des dépressions (terrassement), mais empêchent également leur renouvellement en stabilisant artificiellement l'environnement (canalisation des cours d'eau), tandis que les mares s'atterrissent naturellement. Cette diminution drastique du nombre de mares a également mené à une perte de connectivité entre elles (Oertli & Frossard, 2013).

Parallèlement, l'augmentation des surfaces imperméables participe au risque accru d'inondations, au réchauffement des villes et du climat, et notamment à l'érosion de la biodiversité (Sutton, 2015). Aussi la Suisse a développé une stratégie, dont l'un des objectifs est de promouvoir la biodiversité dans les villes (Conseil fédéral, 2012). Les milieux humides y occupent une place de choix, car ils abritent de nombreuses espèces rares et menacées, en plus de fournir un grand nombre de services écosystémiques contribuant entre autres à la résolution des trois problèmes mentionnés liés à l'imperméabilisation (Dudgeon et al., 2006 ; Hill et al., 2018). Ainsi, l'utilité des milieux aquatiques en zone urbaine est largement reconnue, et ils sont appréciés pour diverses fonctions autres que leur rôle d'habitat écologique (Frossard & Oertli, 2015).

Cependant, malgré l'augmentation progressive du nombre de mares urbaines (Hale, Coleman, Pettigrove, & Swearer, 2015), de l'engouement pour les toitures végétalisées et des incitations existant dans certaines villes suisses (Service des parcs et domaines de la Ville de Lausanne [SPADOM], 2014), les mares présentes sur les toits restent rares. Comme ce fut le cas pour la nature en ville, puis pour les mares urbaines au sol, cette retenue semble principalement être liée à un manque de communication auprès de la population, dans le but de l'informer, de la sensibiliser et de l'impliquer dans cette nouvelle pratique (El Jai & Pruneau, 2015). En effet, les milieux d'eaux stagnantes évoquent une image d'insalubrité lorsqu'ils ne sont pas entretenus régulièrement, ce qui inclut la présence de moustiques, d'algues, de cyanobactéries et l'émission de mauvaises odeurs. On peut cependant y remédier en grande partie par l'aménagement et la gestion adéquate des plans d'eau (Frossard & Oertli, 2015).

Par ailleurs, concernant plus spécifiquement les mares sur toits, la masse supplémentaire que représente un plan d'eau n'est parfois pas compatible avec la statique d'un bâtiment existant, et l'aménagement de mares sur des toits en pente est également plus difficile. Cependant, la plupart des toits sont aujourd'hui plats en ville, et la majorité des mares sur toits existantes en Suisse ont une profondeur moyenne inférieure à quinze centimètres (pour une surface de moins de cinq mètres carrés) et ont donc un faible poids (voir chapitre 3.1) (figure 1), mais l'aménagement de mares sur toits bien plus grandes est également possible (figure 2).

Plusieurs études ont été menées sur la biodiversité des mares urbaines, mais apparemment aucune ne concerne celles se trouvant sur les toits (Zehnsdorf et al., 2019), à l'exception d'une indirectement (Nagase & Nomura, 2014). Le projet MARETOIT (programme SPARK du FNS), mené par la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture (HEPIA), étudie le potentiel de séquestration du carbone de ces mares urbaines situées sur les toitures. En collaboration avec celui-ci, le présent travail s'intéressera plus particulièrement à la biodiversité de ces plans d'eau. Il s'agit en l'occurrence de mares ($\leq 5'000 \text{ [m}^2\text{]}$ et $\leq 2 \text{ [m]}$ de profondeur (Oertli & Frossard, 2013)), situées sur les toitures de plusieurs grandes villes du Plateau suisse.

Les trois questions de recherche sur lesquelles cette étude se focalise sont :

- Est-ce que les mares sur toits des grandes villes du Plateau suisse hébergent une biodiversité aquatique ?
- Si tel est le cas, quelle est cette biodiversité, et est-elle similaire à celle des autres types de mares (cf. urbaines ou rurales) ? Il s'agira donc de caractériser celle-ci.
- Et finalement, quelles pratiques d'aménagement et de gestion sont favorables à la biodiversité aquatique sur les toitures urbaines ?

Pour répondre à ces questions, les objectifs visés par cette étude sont les suivants :

- Evaluer la biodiversité présente dans les mares situées sur les toitures urbaines en Suisse. Les groupes indicateurs choisis sont la végétation aquatique (hydrophytes et hélophytes), les macroinvertébrés aquatiques et les amphibiens.
- Mettre en évidence les bonnes pratiques d'aménagement et de gestion de ce type de mares, afin de promouvoir la biodiversité aquatique sur les toitures et de limiter les externalités négatives y étant liées (disservices).



Figure 1 : Mares sur toit de petites tailles, avec en haut la mare Fenic (Genève) de 7 m² et 15 cm de profondeur moyenne (14 juin 2021), et en bas la mare Gossa6 (Saint-Gall) de 5 m² et 8 cm de profondeur moyenne (10 juin 2021)



Figure 2 : Mares sur toit de grandes tailles, avec en haut la mare Sonnex (Genève) de 750 m² et 30 cm de profondeur moyenne (21 juin 2021), et en bas la mare BITGE (Genève) de 3550 m² et 21 cm de profondeur moyenne (22 juin 2021)

2. Cadre général

2.1. Nature en ville

Contexte global

La croissance démographique et l'exode rural continuent dans le monde. La part de citadins est ainsi passée de 33 % de la population mondiale en 1950 à 55 % en 2018, et il est prévu qu'elle atteigne 70 % en 2050, et ce parallèlement à un accroissement démographique mondial (United Nations, 2018). Cette augmentation importante des populations citadines entraîne l'expansion et la densification des zones urbaines, et par conséquence la destruction de milieux naturels. Face à ce constat, le concept de développement durable a vu le jour lors du Sommet de la Terre de Rio en 1992, avec pour but de laisser une place à la biodiversité dans le développement des sociétés. Les villes occupent ainsi un rôle central par le fait qu'on les considère souvent comme opposées à la nature, alors qu'elles servent de lieu de vie à la majorité de l'humanité (Clergeau, 2014). Il convient donc de changer la perception des villes en informant et en sensibilisant le public et les décideurs politiques sur les intérêts de la nature en ville, afin d'améliorer leur acceptation, leur adhésion voire leur participation à l'élaboration de tels projets (El Jai & Pruneau, 2015).

Services écosystémiques

Les milieux aquatiques et végétalisés urbains fournissent de nombreux bénéfices appelés services écosystémiques (Dover, 2015), comme :

- La diminution des îlots de chaleur,
- La réduction du risque d'inondations,
- L'épuration de l'eau et de l'air,
- La séquestration du carbone,
- La participation à l'éducation,
- L'amélioration du paysage et du cadre de vie de façon générale, avec des effets positifs sur la santé et la qualité de vie.

Ces milieux intra-urbains participent également à la préservation de la biodiversité et peuvent parfois héberger une richesse spécifique comparable à celle de leurs milieux naturels équivalents (Filazzola, Shrestha, & Scott MacIvor, 2019), bien qu'elle ne soit pas similaire en termes de composition (Teixeira & Fernandes, 2020), mais la recherche reste à approfondir sur ce sujet selon Filazzola. En raison de ce potentiel, ces milieux sont soutenus dans le cadre de stratégies nationales (Stratégie Biodiversité Suisse (Conseil fédéral, 2012)) voire internationales (Stratégie de l'UE en faveur de la

biodiversité à l'horizon 2030). La conception d'un réseau de milieux est une vision partagée par ces stratégies, et celles-ci comprennent souvent les milieux naturels extérieurs aux villes. Ce point est d'une importance capitale pour favoriser au mieux le potentiel de promotion de la biodiversité des milieux composant ces réseaux (Beninde, Veith, & Hochkirch, 2015 ; Parris, 2016). Les formes que prennent les infrastructures écologiques sont variées et complémentaires, et seules les deux en lien avec le sujet de ce travail sont abordées ici, à savoir les mares urbaines et les toitures végétalisées.

2.2. Mares urbaines

Services écosystémiques

Un intérêt croissant est porté aux plans d'eau urbains, également dans la recherche, en raison des services écosystémiques très appréciés qu'ils fournissent (Oertli & Parris, 2019). Ils sont ainsi étudiés et aménagés pour :

- La fraîcheur qu'ils génèrent dans les îlots de chaleurs formés par les villes,
- Leur capacité de rétention d'eau permettant de limiter le risque de surcharge du réseau d'évacuation et donc le risque d'inondations,
- Le traitement décentralisé des eaux (principalement de pluie et de ruissellement) par filtration et phytoépuration,
- La séquestration du carbone grâce à leur bonne productivité primaire de biomasse végétale,
- La réserve d'eau qu'ils représente (irrigation, incendies),
- Leur valeur esthétique,
- Les loisirs qu'ils permettent (baignade, pêche, ...).

La grande majorité de ces mares est donc généralement uniquement conçue dans le but de fournir l'un de ces services, en oubliant leur intérêt pour la biodiversité (Oertli & Parris, 2019). Un parallèle peut être fait avec la reconnaissance relativement récente des mares de façon générale pour la conservation de la biodiversité et la législation encore lacunaire concernant leur protection en Europe. Ceci découle de leur taille et richesse spécifique individuelle (alpha) généralement réduite et de leur intérêt en réseau (Oertli, 2018).

Caractéristiques

En raison de ce manque de connaissance, les mares urbaines ne sont souvent pas aménagées et gérées de façon à favoriser la biodiversité (Oertli & Parris, 2019). Malgré leur grande diversité d'usages, elles diffèrent des mares hors des villes (Frossard & Oertli, 2015), avec comme caractéristiques :

- Une surface réduite,
- Des eaux peu profondes,
- Des rives monotones peu découpées,
- Peu de couverture végétale,
- Un substrat et une étanchéité artificielles (fond et rives),
- Des eaux polluées de mauvaise qualité,
- La présence d'espèces exotiques (plantes, poissons, canards),
- Une intervention humaine marquée,
- Leur jeune âge.

À cela s'ajoute l'environnement bâti hostile aux déplacements dans lequel elles se retrouvent isolées des autres milieux aquatiques (Hassal, 2014).

Biodiversité

La pauvreté structurelle et l'isolement de ces petits plans d'eau en milieu urbain explique leur richesse spécifique alpha inférieure à celle des mares naturelles (Frossard & Oertli, 2015 ; Hill, Ryves, White, & Wood, 2016). Elles préservent cependant une biodiversité beta et gamma élevée, dont des espèces rares et menacées, grâce à leurs gestions et conditions variées (Zamora-Marín et al., 2021). Cette richesse peut être comparable à celle des mares naturelles, contrairement aux mares agricoles (Hill, Ryves et al., 2016). De plus, la composition de cette richesse n'est pas la même entre les mares naturelles, agricoles et urbaines, et ces dernières participent ainsi grandement au soutien de la biodiversité à l'échelle régionale par complémentarité (Hill, Biggs, et al., 2016). En outre, les mares artificielles sont relativement nombreuses et ont tendance à remplacer celles naturelles dans les paysages anthropisés (Oertli, 2018 ; Zamora-Marín et al., 2021). Ces mares occupent ainsi une place importante pour la conservation d'une multitude d'espèces en leur servant de milieux de remplacement (néohabitats), sans lesquels elles ne pourraient se maintenir dans ces paysages transformés (Hill et al., 2018).

L'intérêt des mares urbaines pour la biodiversité réside donc dans leur nombre (densité) et leur diversité (hétérogénéité de conditions), en particulier si elles sont correctement aménagées et gérées, c'est-à-dire en considérant leur rôle d'habitat et de façon à former un réseau interconnecté avec des milieux naturels (Oertli, 2018). Cette approche des mares comme réseau intégré dans un paysage (pondscape) est en effet considérée comme étant la plus appropriée pour les gérer de façon à promouvoir la plus grande biodiversité possible. Ces réseaux présentent l'avantage d'également pouvoir s'implanter dans des paysages fragmentés par l'urbanisation et l'agriculture, où des zones de conservation traditionnelles de grande taille ne peuvent être mises en place (Chester & Robson, 2013 ; Hill et al., 2018).

Pièges écologiques

Un dernier point important à ajouter concernant la mauvaise gestion des mares urbaines est celui des pièges écologiques qu'elles peuvent constituer. Dans le contexte urbain où les habitats de qualité se font rares, une mare bien aménagée et gérée (proche de l'état naturelle) attire beaucoup d'espèces, et ce indépendamment de la qualité de son eau. Or, si cette eau est de mauvaise qualité (polluée), le taux de survie de la progéniture des espèces s'y reproduisant est fortement réduit. Les mares concernées, appelées pièges ou puits écologiques, peuvent ainsi mener à l'épuisement voire la disparition des populations d'espèces occupant des mares proches, même naturelles. Ces milieux pièges possèdent par ailleurs souvent une bonne richesse spécifique, ce qui les rend difficiles à détecter. Afin de prévenir ce problème, il convient de s'assurer qu'une mare possède une eau de suffisamment bonne qualité avant d'appliquer des mesures de gestion favorables à la biodiversité (Hale, Coleman, Pettigrove, & Swearer, 2015 ; Sievers, Hale, Swearer, & Parris, 2018).

2.3. Toitures végétalisées

Services écosystémiques

Les toitures végétalisées bénéficient aujourd'hui d'un engouement important à l'échelle mondiale. En Suisse, la ville de Bâle a par exemple fait végétaliser 30% de ses toitures. Cet intérêt s'explique par les nombreux services écosystémiques qu'elles fournissent (SPADOM, 2014), à savoir :

- Le rafraîchissement de l'air ambiant et l'isolation thermique des bâtiments en diminuant les écarts de température grâce au microclimat généré par les plantes,
- Les économies d'énergie faites en climatisation,
- La protection des matériaux d'étanchéité contre les rayonnements UV et les températures extrêmes,
- L'absorption du bruit,
- La rétention d'eau, qui diminue le risque de surcharge du réseau d'eaux claires et réduit le risque d'inondations,
- La séquestration du carbone, luttant contre le réchauffement climatique,
- L'amélioration du paysage, du cadre de vie et du bien-être (surtout si accessibles),
- L'épuration de l'air et de l'eau de pluie,
- Le recyclage des matériaux utilisés pour sa conception (brique, béton, matériaux d'excavations, ...),
- La promotion de la biodiversité.

Pour ces raisons, la végétalisation extensive des toits plats bénéficie d'un fort soutien politique et financier dans certaines villes Suisse, comme à Lausanne (Directives municipales du 16 août 2018 concernant l'attribution de subventions pour la réalisation de toitures végétalisées extensives sur les bâtiments privés sur le territoire de la Commune de Lausanne (850.1)), ou à Bâle (article 72 de la loi cantonale de Bâle-Ville du 17 novembre 1999 sur la construction et l'urbanisme (= BPG ; 730.100)).

Caractéristiques

Les milieux aménagés sur les toits sont soumis à des conditions particulières, qui sont l'exposition accentuée au soleil et au vent, et la déconnection des milieux au sol. Le type de milieux créé dépend de sa conception, mais les services écosystémiques sont toujours pris en considération. Ils sont généralement extensifs en Suisse et Europe, alors qu'au Japon ils reproduisent un milieu sur sol épais contenant diverses structures et intensivement entretenus, ce qui les rapproche plus d'un jardin (Nagase & Nomura, 2014). Les toitures végétalisées servent ainsi souvent en Suisse de refuge pour de nombreuses espèces (1300 espèces végétales à Lausanne) liées aux milieux pionniers chauds et secs qui sont devenus rares et menacés (SPADOM, 2014) (figure 3).



Figure 3 : Toiture végétalisée extensive reproduisant un milieu xérothermique naturel indigène à Gossau (Saint-Gall), 11 juin 2021

Cadre légal

En Suisse, l'article 14 de l'ordonnance fédérale du 16 janvier 1991 sur la protection de la nature et du paysage, (= OPN ; 451.1), oblige la compensation des dommages faits aux biotopes dignes d'intérêt, dont les milieux xérophiles reproduits sur les toitures extensives font partie (OFEV, 2014). Par ailleurs, selon l'annexe 2.4, art. 4^{bis}.2 et l'annexe 2.5, art. 1.1, al. 2 de l'ordonnance fédérale du 18 mai 2005 sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux (=ORRChim ; RS 814.81), il est interdit d'utiliser des produits biocides contre les algues et les mousses, ainsi que des produits phytosanitaires destinés à éliminer des plantes ou des parties de plantes indésirables ou à influencer une croissance indésirable sur les toits. Cette ordonnance protège ce faisant les milieux des toitures contre certaines atteintes chimiques, mais les insecticides servant à éliminer certains nuisibles ne sont pas concernés. En plus de ces documents, les normes SIA 312 (2013) et 270 (2007) encadrent la réalisation de toitures végétalisées.

2.4. Mares sur toitures

Aperçu global

Les mares sur toits sont un nouveau type de milieu urbain, et représente la réunion d'une mare et d'une toiture végétalisée. Elles sont d'ailleurs souvent assimilées à cette deuxième structure, et peu de documentation spécifique en traite (livingroofs.org, 2021). Elles fournissent les mêmes services écosystémiques que les toitures végétalisées, mais la supposition est faite qu'elles permettent d'amplifier les bénéfices qu'elles partagent avec les mares urbaines. De plus, elles ne prennent pas de place au sol et permettent de délocaliser sur les toits certains bénéfices des mares urbaines (épuration, éducation, loisirs). Elles n'entrent donc pas en compétition pour la surface au sol avec d'autres usages et diminuent ainsi la pression exercée sur le foncier dans les zones urbaines (Zehnsdorf et al., 2019). Malgré cela, leur utilisation reste pour le moment marginale, mais plusieurs entreprises commencent à proposer ce type d'aménagement, dont certaines en Suisse, comme Contec AG et Bauder AG.

Aménagement, gestion et variables environnementales

Il n'existe apparemment aucun document n'abordant spécifiquement l'aménagement et la gestion des mares sur toits pour promouvoir la biodiversité. Les conseils trouvés concernant les mares urbaines au sol ont donc été repris et mis en perspective (Frossard & Oertli, 2015 ; Oertli & Parris, 2019). Ainsi, les aspects semblant être à privilégier sont (liste non-exhaustive) :

- Une grande surface (limitée par les dimensions du toit),
- Une profondeur moyenne élevée (limitée par la statique du bâtiment, voire impossible sur les toits),
- Des berges irrégulières en pente douce,
- Un substrat naturel,
- Une eau de bonne qualité,
- Une présence d'eau permanente (dépend des espèces considérées),
- Un bon recouvrement du plan d'eau et des berges par une végétation variées (structure et composition spécifique),
- De l'ombrage,
- L'absence de poissons et de néophytes invasives,
- La présence d'autres espaces verts et bleus à proximité.

Parmi ceux-ci, les facteurs clés sont la surface (augmentation de la capacité d'accueil et généralement de la diversité de microhabitats), la période en eau (compatibilité avec le cycle de vie des espèces aquatiques), et la végétation (abri, nourriture, reproduction, ponte, perchoir, ...) (Mak, Scholz, & James, 2017 ; Oertli & Parris, 2019).

Aménager et gérer une mare en suivant ces mesures augmente le nombre d'espèces qu'elle héberge, mais il faut garder à l'esprit que ce qui fait la valeur des mares est leur diversité à l'échelle du paysage et leur complémentarité. Chaque mare est unique en termes de conditions et de biodiversité, et chacune a son rôle à jouer en fonction de sa position dans le réseau. Il est ainsi bienvenu d'avoir par exemple des surfaces non végétalisées ou des périodes d'assec pour certaines mares (Oertli & Parris, 2019).

Biodiversité

Les seuls articles trouvés sur le sujet des mares sur toits concernent divers services écosystémiques autres que la promotion de la biodiversité (Sharifi & Yamagata, 2015 ; Song et al., 2013 ; Vo et al., 2019), et le seul article l'évoquant concède les lacunes sur le sujet (Zehnsdorf et al., 2019). Ceci est probablement dû au fait qu'elles soient encore assimilées à un simple élément diversifiant des toitures végétalisées, par exemple en servant d'abreuvoir et de zone de rafraîchissement aux espèces de passages ou à celles déjà présentes sur le reste de la toiture (SPADOM, 2014 ; livingroofs.org, 2021). Cependant, les mares sur toits sont reconnues comme étant un élément clé pour la survie de certaines de ces espèces, y compris comme source de nourriture, à l'exemple du Vanneau huppé pouvant nicher sur des toitures végétalisées (Horch, Baumann, Abt, Wirz, & Brenneisen, 2015) (figure 4). De plus, une étude japonaise a mis en avant que le plus grand nombre d'invertébrés relevés sur ces toits se trouvaient dans la zone humide et ombragée de la mare (Nagase & Nomura, 2014). Ces mares constituent donc

un milieu et génère un microclimat qui permettent la présence sur les toits d'un grand nombre d'espèces, en diversifiant leur caractère généralement xérothermique en Europe de l'Ouest. Il faudra toutefois veiller à ce qu'elles n'hébergent pas d'organismes considérés comme nuisibles par la population vivant à proximité, tels les moustiques et les grenouilles (bruit).



Figure 4 : Toiture végétalisée d'Emmen (Lucerne) sur laquelle niche le vanneau huppé (zoom en haut à droite), avec au premier plan la mare AlsoH, 10 juin 2021

Réseaux écologiques

La forte régression des zones humides a mené à une perte de connectivité entre elles (Oertli & Frossard, 2013), or les mares fournissent des habitats essentiels pour de nombreuses espèces rares et menacées, et sont des refuges importants dans les paysages urbanisés (Hill et al., 2018). La récente prise de conscience des décideurs politiques du potentiel écologique de ces plans d'eau urbains a nouvellement mené à leur intégration dans des réseaux verts et bleus traversant les villes, soit par leur création soit par la restauration de leur fonction d'habitat (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement [Cerema], 2015 ; Mak et al., 2017). Ces réseaux sont composés de mares, étangs, rivières et lacs, ainsi que de leurs abords, qu'ils soient naturels ou artificiels, urbains ou ruraux. Ils permettent des flux d'espèces entre ces plans d'eau à l'échelle du paysage. L'intérêt de la création d'un tel réseau est grand du point de vue de la conservation des espèces aquatiques, surtout lorsque l'on considère que la majorité des plans d'eau situés dans les paysages anthropisés sont artificiels (Zamora-Marín et al., 2021).

L'une des principales caractéristiques influençant probablement la biodiversité des mares sur toits est leur éloignement du sol. Cet aspect les isole du reste du réseau pour les groupes d'espèces se déplaçant au sol (cf. amphibiens). Les groupes observés seront donc normalement caractérisés par une dispersion aérienne, active (libellules) ou passive (plantes). Dans le cas contraire, elles auront soit réussi à grimper jusqu'à la toiture, soit été transportées par une personne ou une autre espèce. Cela n'exclut pas l'intérêt d'intégrer ces mares au réseau de milieux humides, car l'existence de corridors biologiques aériens « en pas japonais » a été mise en évidence pour les espèces volantes utilisant les toitures végétalisées (Baumann, 2014).

Par ailleurs, les mares sur toits peuvent bénéficier des mêmes lois que les toitures végétalisées. Elles pourraient en effet compenser une partie des dommages faits aux biotopes d'intérêts que sont les zones humides (OPN, art. 14), et ce faisant bénéficier d'un soutien économique pour leur aménagement. De plus, les restrictions importantes de l'ORRChim concernant l'utilisation de pesticides sur les toits limitent considérablement le risque de pollution de l'eau de ces mares, qui ont de surcroît de petits bassins versants avec un apport d'eau de pluie a priori faiblement polluée.

3. Matériel et méthodes

3.1. Site d'étude

Le site d'étude est constitué de 37 mares situées sur les toitures de plusieurs grandes villes du Plateau suisse (figure 5). Il s'agit d'une grande partie des mares étudiées par le projet MARETOIT, cinq n'ayant pas pu être visitées pour des questions de manque de sécurité pour accéder aux toits. Elles sont réparties comme suit, certaines se trouvant sur la même toiture :

- 9 à Genève
- 11 dans le canton de Vaud, principalement à Lausanne
- 2 dans le canton de Bern, près de Thoune
- 2 à Lucerne
- 2 en Argovie, près de Zoug
- 11 à Saint-Gall

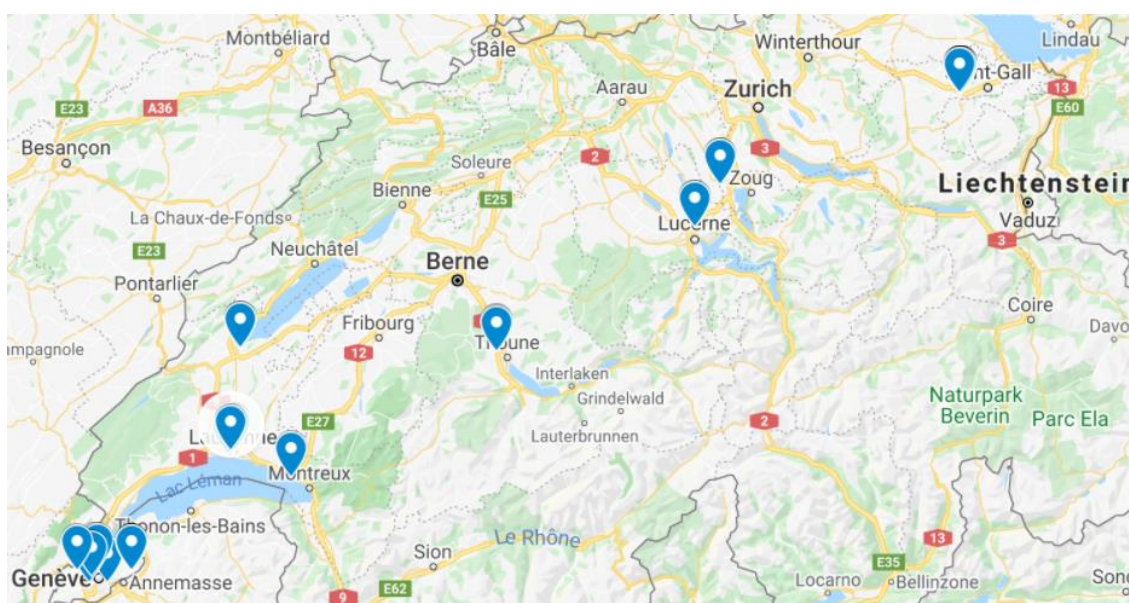


Figure 5 : Répartition des 37 mares sur toits inventoriées dans plusieurs grandes villes du Plateau suisse en juin 2021

(Source : Google My Maps)

Les caractéristiques (ou paramètres environnementaux) de ces mares en termes d'aménagement, de gestion et de physico-chimie de l'eau ont été rassemblées dans le cadre du projet MARETOIT et sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous.

Un tableau présentant une description plus complète des mares se trouve à l'annexe 1. Il contient des informations supplémentaires, dont des données sur la faune et la végétation qui sont abordés dans le chapitre des résultats. On note que la hauteur des toitures sur lesquelles se trouvent les mares est très variable, allant de 0,5 à 28 mètres (tableau 1), mais elles sont le plus souvent situées entre 5 et 15 mètres (figure 6).

Tableau 1 : Valeurs clé des paramètres de l'environnement des 37 mares en juin 2021

	Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Médiane
Infos générales	Surface [m2]	123,8	1	3550	3,5
	Profondeur moyenne [cm]	11,4	4	40	8,5
	Profondeur maximale [cm]	16,5	8	45	12
	Pluviométrie (moyenne annuelle 1980-2020) [mm/an]	1109,6	761	1265	1174
	Régime hydrologique (1=rarement en eau - 5=permanent)	2,8	1	5	3
	Hauteur de la toiture [m]	11,5	0,5	28	12
	Epaisseur du substrat [cm]	1,2	0	5	0
	Richesse de micro-habitats	6,6	2	10	7
	Diversité de micro-habitats (indice de diversité de Shannon)	1,6	0,9	1,9	1,7
Physico-chimie	pH moyen	8,8	7,2	10,8	8,6
	Conductivité moyenne [uS/cm2]	168,6	36	313	174,1
	Transparence minimale [cm]	28,5	2	60	20
	Turbidité maximale [FTU]	20,3	4,9	130,6	12,1
	Cyanobactérie maximale [ug/L]	24,3	0	188,6	6,1
	Chlorophylle a (Chla) maximale [ug/L]	147,8	3,4	866,8	51,8
	Phosphore total (Ptot) [mg/L]	0,1	0	0,4	0
	Niveau trophique (selon max Ptot ou Chla ; 1=oligotrophe, 2=mésotrophe, 3=eutrophe, 4=hypertrophe, 5=hautement hypertrophe)	3,4	2	5	4

On remarque que la majorité des mares sur toits étudiées sont de petites tailles, avec 76% d'entre elles ayant une surface inférieure ou égale à 5 m² (figure 6). Elles sont également peu profondes, et seuls 20% ont une profondeur moyenne supérieure à 20 cm (figure 6).

La pluviométrie annuelle moyenne présente des différences importantes avec un écart entre les mares allant jusqu'à 500 [mm/an] (figure 6). En outre, près de la moitié sont alimentées en eau au moins occasionnellement (figure 6 et annexe 1). Des relevés continus de la présence d'eau avec des data loggers ont permis d'estimer le régime hydrologique des mares, autrement dit leur permanence en eau (figure 6). Il s'avère que seulement 3 mares sont considérées comme permanentes, les autres s'asséchant plus ou moins longtemps et régulièrement. Les mares sur toits sont donc principalement des milieux temporaires.

En termes d'aménagement, les mares sur toits inventoriées sont le plus souvent constituées d'une bâche en plastique (78%), présentent des pentes douces (76%), et ne possèdent pas de substrat (54%) ou seulement très peu (maximum de 5 cm) (annexe 1 et figure 7). Malgré cela, elles sont toutes constituées de plusieurs micro-habitats, avec une médiane de 7 (tableau 1), dont la richesse a été définie en fonction des éléments relevés dans les 37 mares en juin 2021 (annexe 1). La diversité de micro-habitats a été calculée selon l'indice de diversité de Shannon, qui se base sur leur proportion de recouvrement dans les mares, traduisant ainsi mieux leur structure que la richesse.

Concernant la qualité de l'eau, les mares inventoriées sont principalement eutrophes ou hypertrophes (figure 6), et l'eau qu'elles contiennent est basique avec un pH moyen variant autour de 8,7 (tableau 1 et figure 6).

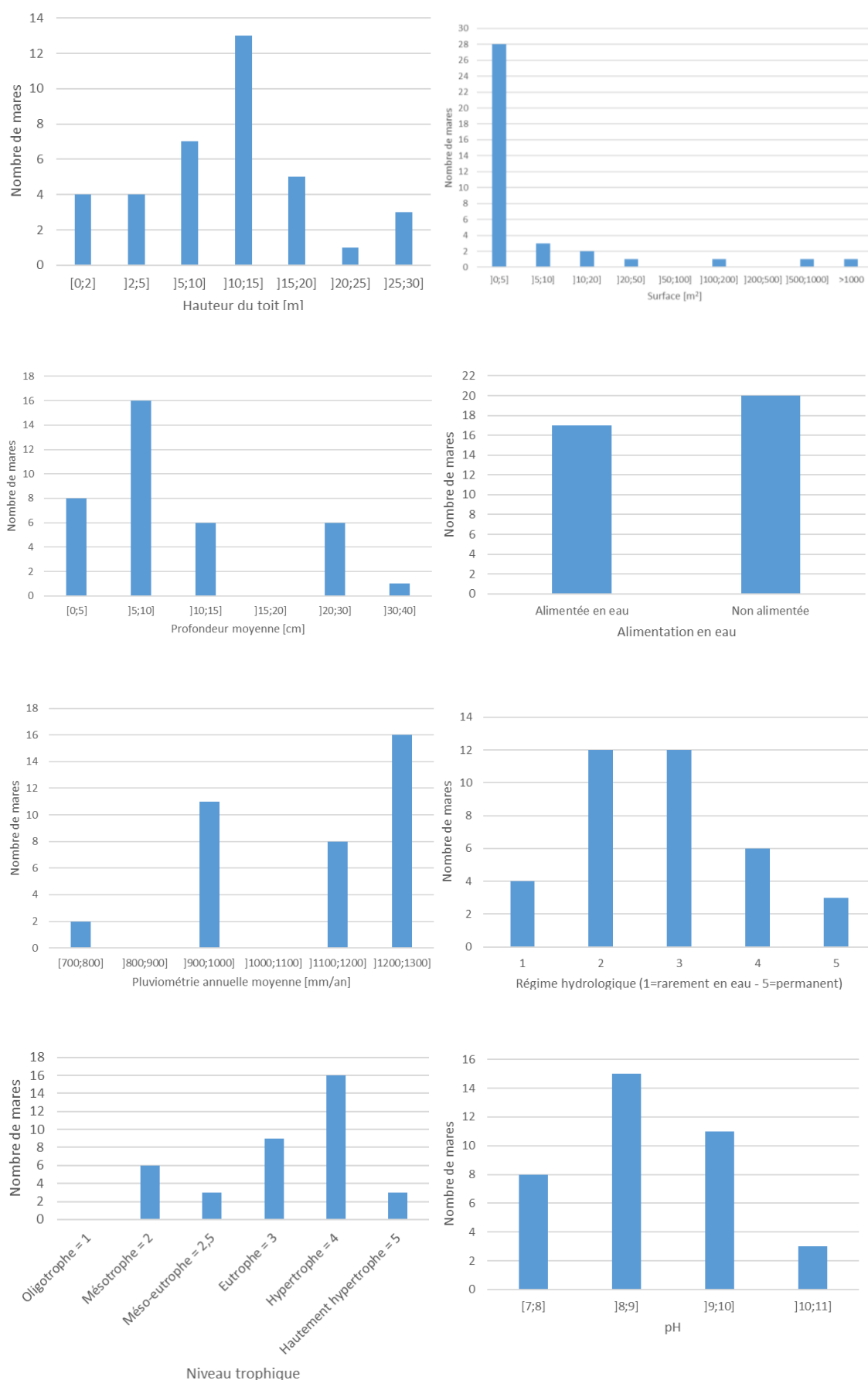


Figure 6 : Fréquence de la hauteur du toit par rapport au sol, de la surface, de la profondeur moyenne, de l'alimentation en eau, de la pluviométrie annuelle moyenne, du régime hydrologique, du niveau trophique et du pH moyen des 37 mares en juin 2021



Figure 7 : Mare BleuE (Vaud), caractéristique de celles inventoriées, de petite surface (2,5 m²), de faible profondeur (maximum 10 cm), avec une bâche en plastique, des pentes douces et peu de substrat, 25 juin 2021

3.2. Démarche méthodologique

Ce travail s'intéressera à la végétation aquatique (hydrophytes et hélophytes), aux macroinvertébrés aquatiques et aux éventuels amphibiens (groupe phare des zones humides, mais inattendu dans ce contexte), qui pourraient se trouver dans les mares sur toits étudiées. Ces groupes étant ceux privilégiés lors d'études sur les mares et étangs (Indermuehle, Angélibert, & Oertli, 2008), les données récoltées permettront de confirmer ou non la présence d'espèces dans ces mares. Elles donneront, le cas échéant, un bon aperçu de la biodiversité qu'elles hébergent, et permettront d'estimer la valeur patrimoniale et les disservices potentiels de ces milieux. Elles devraient également permettre de mettre en évidence les paramètres de l'environnement ayant une influence sur la présence de ces groupes. Sur cette base, des mesures d'aménagement et de gestion favorables à ceux-ci pourront être proposées, afin d'optimiser le potentiel de promotion de la biodiversité des mares sur toits, tout en veillant à limiter les externalités négatives.

3.3. Méthodes de collecte des données

Méthode de relevé de la biodiversité des mares sur toits

La méthode IBEM, qui est celle de référence en Suisse pour l'étude des mares et étangs, ne peut pas être utilisée dans le cadre de cette étude, car elle n'est applicable que sur des plans d'eau ayant une surface d'au moins 50 m² et une profondeur d'au moins 30 cm (Indermuehle et al., 2008). Or, 76% des mares étudiées font moins de 5 m² (figure 6) et la valeur médiane de leur profondeur maximale est de 12 [cm] (tableau 1).

Une nouvelle méthode a donc été élaborée, avec pour but d'obtenir la vision la plus complète possible de la biodiversité hébergée par les mares sur toit en Suisse (tableau 2, et matériel en figure 8 et annexe 2). Elle consiste en :

1. Décrire la mare et la faune observée.
2. Relever la végétation.
3. Relever les macroinvertébrés aquatiques.

Tableau 2 : Descriptif de la méthode d'inventaire utilisée pour les 37 mares sur toits en juin 2021

	Paramètre	Unité	Méthode
Végétation	Recouvrement végétal du bord	Pourcentage de la surface	Estimation visuelle sur la zone riveraine entourant la mare (bande de 50 cm de large)
	Recouvrement végétal dans la mare	Pourcentage de la surface	Estimation visuelle globale et par type de végétation : hydrophytes libres à feuilles flottantes ou nageantes, hydrophytes fixées à feuilles submergées, hydrophytes fixées à feuilles flottantes, héliophytes, végétation terrestre
	Richesse en plantes aquatiques	Nombre d'espèces	Relevé exhaustif des plantes vasculaires dans la mare (avec coefficient d'abondance-dominance de Braun-Blanquet) et somme des espèces retenues par la méthode IBEM (Indermuehle et al., 2008)
Macrofaune	Richesse en macroinvertébrés aquatiques	Nombre de familles	Capture à l'épuisette en 4 prélèvements de 10 coups de 30 cm sur environ 30 x 30 cm, chaque prélèvement éloignés des autres de façon à couvrir la plus grande diversité de micro-habitats, si la mare est assec prélèvement du substrat présent dans 10 x 10 cm au fond de la mare (jusqu'à l'étanchéité) et rinçage dans le bac de tri, estimation de l'abondance des taxons dans le bac de tri et somme des familles (déterminées en laboratoire)
	Présence d'autres groupes faunistiques	Nombre d'individus	Relevé par observation avec estimation de l'abondance des amphibiens (à l'espèce), libellules adultes (à l'espèce), moustiques adultes (préciser si moustique tigre) et poissons

Indications supplémentaires :

- Le périmètre d'une mare est défini en suivant le contour de la concavité la formant, autrement dit de la surface pouvant se trouver immergée. Les espèces végétales situées hors de ce périmètre ne sont donc pas relevées. En cas de doute, il faut se baser sur la limite de la surface étanchéifiée (bâche plastique, bassin de béton, etc.).

- Se rapprocher lentement durant l'étape 1, car certaines espèces sont sensibles au mouvement (observation environ une minute à 10-15 mètres, une minute à 2-5 mètres, puis tour rapproché de la mare).
- Il est recommandé d'effectuer les relevés lors d'après-midi ensoleillées et peu venteuses succédant à au moins 2-3 jours de beau temps pour favoriser l'observation de libellules adultes (Indermuehle et al., 2008).
- Photographier les mares pour avoir une preuve et un souvenir de leur état lors de l'effectuation des inventaires.



Figure 8 : Matériel nécessaire au relevé des macroinvertébrés aquatiques, de gauche à droite : bidon d'eau, bac blanc, épuisette, tubes, pissette d'alcool à 70%, cuillères, pinces, feuille de note

L'organisation des relevés a été faite en étroite collaboration avec M. Decrey et R. Jeanloz dans le cadre du projet MARETOIT. Préalablement à chaque relevé, une autorisation d'accéder aux mares avec prise de rendez-vous a été demandée aux différents propriétaires des toitures. Un seul passage a été effectué dans chacune des mares, car le temps à disposition était trop restreint pour organiser et effectuer une deuxième série de relevés. Tous les relevés ont été effectués en juin 2021, ce mois étant propice pour les effectuer (Indermuehle et al., 2008). Le temps nécessaire à leur réalisation a généralement été d'une demi-heure ou d'une heure, avec quelques exceptions pour les plus grandes mares, qui ont nécessité deux-trois heures (annexe 1).

Phase de laboratoire

Les macroinvertébrés aquatiques ont été déterminés avec l'aide d'E. Demierre, laborantine en écologie des systèmes aquatiques à HEPIA. Le niveau taxonomique visé est la famille, puis l'espèce pour les groupes taxonomiques sur liste rouge en Suisse, à savoir les odonates, éphéméroptères, trichoptères, plécoptères, coléoptères (*Dytiscidae* et *Halipidae*) et gastéropodes. La présence de moustique tigre a également été recherchée parmi les diptères *Culicidae*.

Le matériel utilisé est : des clés de détermination, une loupe binoculaire, une pince, une boîte de Petri ou un verre de montre, des petits tubes avec bouchons, de l'alcool à 70%, des étiquettes, un crayon et un ordinateur pour saisir les données. Chaque petit tube ne contient qu'un taxon d'une mare capturé à une seule date, et une étiquette avec le nom de l'étude et de la mare, la date de capture et le nom du taxon.

Autres sources de données

Les informations sur l'aménagement et la gestion des mares ont été récoltées par M. Decrey et R. Jeanloz auprès des propriétaires et gestionnaires des toitures dans le cadre du projet MARETOIT. Ce sont ces deux mêmes collaborateurs qui ont relevé les données concernant les paramètres de l'environnement présentés dans le tableau 1, en dehors de la richesse en micro-habitats.

Les données sur la présence des groupes taxonomiques dans les mares du projet MARVILLE (Oertli & Ilg, 2014), ainsi que la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) et la surface des mares du projet PLOCH (Oertli, Auderset Joye, Castella, Juge, & Lachavanne, 2000) sont rendues accessibles par HEPIA et ont été transmises par B. Oertli.

3.4. Traitement et analyse des données

Paramètres de l'environnement liés à la présence des groupes étudiés

Toutes les données récoltées sont saisies sur tableau Excel. Les macroinvertébrés aquatiques remarqués uniquement par observation ne sont pas pris en compte, car ils sont relevés de façon différente et non standardisée. La richesse des groupes relevés est mise en corrélation avec les différents paramètres de l'environnement (recouvrement de la végétation comprise). Les variables comportant une majorité de valeurs nulles ne sont pas analysées, car les résultats en découlant ne seraient pas statistiquement significatifs. Une matrice de corrélation de Spearman de toutes ces variables (avec un niveau de confiance de 95) est ensuite générée sur Minitab, et celles faisant doublons sont également retirées des analyses (conductivité dépend de la pluviométrie, transparence dépend de la chlorophylle a) (annexe 3). Les paramètres ayant le plus d'influence sur la richesse sont présentés sous forme de nuages de points avec courbe de régression linéaire (valeur de p déterminer sur Minitab).

Pour modéliser le lien entre les paramètres de l'environnement et la richesse des groupes, un modèle de régression pas à pas par sélection ascendante des paramètres retenus est généré sur Minitab (avec alpha pour inclure de 0,25 ou 0,1). Les résultats sont présentés sous forme d'un diagramme de Pareto.

Biodiversité des mares sur toits comparée à celle des mares au sol

La fréquence de présence des groupes taxonomiques relevés dans les mares sur toits est comparée sous forme d'histogramme à celle des mares au sol (urbaines et rurales) sur la base des données de 81 mares du projet MARVILLE (Genève, 2012-2013). La richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) relevée dans ces deux types de mares est ensuite comparée sous forme de boîtes à moustaches sur la base des données de 60 mares en-dessous de 1000 mètres d'altitude du projet PLOCH (Suisse, 1996-2005). Cette richesse est également comparée en fonction de la surface sous forme de nuages de points accompagnés de courbes de régression linéaires.

Bien que les données de ces deux projets aient été relevées de façon différente (par échantillonnage selon la méthode IBEM), elles sont considérées comme comparables à celles relevées dans le cadre de cette étude, car les mares inventoriées se trouvent en Suisse et seules celles situées en dessous de mille mètres d'altitude sont retenues.

Ceci permettra de faire une première évaluation de la biodiversité hébergée par les mares sur toits et de leur participation à la préservation de celle-ci.

3.5. Limites de la méthode

La première limite de la méthode adoptée est de ne comprendre temporellement qu'un seul relevé. Les milieux inventoriés étant majoritairement des petits plans d'eau temporaires, les espèces pouvant être trouvées dedans varient logiquement selon la saison et la météo de l'année. Il suffit par exemple d'une dizaine de jours en eau en été pour que certains diptères, comme les moustiques, passent du stade d'œuf à celui d'adulte (Oertli & Frossard, 2013). Les résultats obtenus sont donc à considérés comme une première évaluation de la biodiversité hébergée par les mares sur toits du Plateau suisse en juin 2021.

Deuxièmement, seuls les macroinvertébrés aquatiques sont relevés de façon standardisée, mais avec une méthode nouvellement créée. La végétation aquatique (hydrophyte et hélophyte), les amphibiens et les libellules adultes sont relevée de façon exhaustive, et les autres groupes sont uniquement mentionnés si observés sans bénéficier d'autant d'attention. La méthode de relevé ne couvre donc pas tout les groupes pouvant se trouver dans ces mares, en particulier les différents types de plancton et la végétation non-vasculaires, mais également les oiseaux aquatiques.

Troisièmement, la définition des espèces végétales aquatiques est faite selon la liste de référence de la méthode IBEM, et les plantes n'y étant pas mentionnées sont considérées comme de la végétation terrestre (Indermuehle, 2008). La richesse spécifique calculée dans cette étude n'est donc pas comparable à celle d'autres études ne s'appuyant pas sur la même liste. Elles pourraient en effet, pour les 37 mêmes mares, comptabiliser des espèces végétales supplémentaires, comme des certaines vivant en milieux aquatiques et présentant un coefficient d'humidité de Landolt de 4 (*Polygonum mite*, *Lythrum salicaria*, *Epilobium hirsutum*), ou comme des espèces horticoles non référencées dans la flore de Suisse (*Iris* sp., *Dianella* sp., *Canna* sp.) (Info Flora, 2021). Par ailleurs, seuls les paramètres environnementaux relevés dans le cadre du projets MARETOIT et de la présente étude pourront être intégrées aux analyses, ce qui exclut par exemple l'âge des mares, la durée d'exposition au soleil, la température et l'oxygénation de l'eau.

4. Résultats

4.1. Végétation aquatique

Liste des espèces

Au total, 23 espèces végétales aquatiques ont été relevées dans les 37 mares inventoriées en juin 2021 (tableau 3), en retenant uniquement celles mentionnées dans la liste de référence de la méthode IBEM (Indermuehle, 2008).

Parmi ces espèces, trois sont potentiellement menacées (statut NT) et une seule est vulnérable (statut VU) et présente sur liste prioritaire en Suisse (Bornand et al., 2016 ; OFEV, 2019) (tableau 3). Il s'agit du vulpin fauve, *Alopecurus aequalis* (Sobol.), dont deux petites populations de 1-2 m² ont été relevées dans les mares GemB (Argovie) et Gossa2 (Saint-Gall) (figure 9 et annexe 4).

Les néophytes aquatiques sont peu nombreuses, et des espèces invasives n'ont été relevées que dans une seule mare particulièrement profonde (Buholzer, Nobis, Schoenenberger, & Rometsch, 2014). Il s'agit de l'élodée de Nuttall, *Elodea nuttallii* ((Planch.) H. St. John) et du myriophylle aquatique, *Myriophyllum aquaticum* ((Vell.) Verdc.), qui ont tous deux été repérées dans la mare ConcG (Bern) en deux populations bien installées (annexe 4).



Figure 9 : Population d'*Alopecurus aequalis* dans la mare Gossa2 (Saint-Gall), 11 juin 2021

Tableau 3 : Liste des plantes aquatiques relevées, classées par types de végétation, avec leur statut de menace en Suisse et leur fréquence de présence dans les 37 mares en juin 2021

Taxon	LR	LP	Fréquence de présence
Hélophytes			19%
<i>Alopecurus aequalis</i>	VU	4	5%
<i>Carex flava</i> aggr.	LC	-	5%
<i>Eleocharis palustris</i> aggr.	NT	-	3%
<i>Equisetum hyemale</i>	LC	-	3%
<i>Eriophorum latifolium</i>	LC	-	3%
<i>Iris pseudacorus</i>	LC	-	3%
<i>Juncus articulatus</i>	LC	-	11%
<i>Juncus effusus</i>	LC	-	3%
<i>Mimulus guttatus</i> aggr.	-	-	3%
<i>Phragmites australis</i>	LC	-	8%
<i>Pontederia cordata</i>	-	-	5%
<i>Sparganium erectum</i>	NT	-	3%
<i>Typha angustifolia</i>	NT	-	5%
<i>Typha latifolia</i>	LC	-	5%
<i>Veronica beccabunga</i>	LC	-	3%
Hydrophytes à feuilles flottantes			5%
<i>Menyanthes trifoliata</i>	LC	-	3%
<i>Nuphar lutea</i>	LC	-	3%
<i>Nymphaea</i> sp.	-	-	5%
<i>Potamogeton natans</i>	LC	-	3%
Hydrophytes à feuilles submergées			3%
<i>Ceratophyllum demersum</i>	LC	-	3%
Characeae	-	-	3%
<i>Elodea nuttallii</i>	LN	-	3%
<i>Myriophyllum aquaticum</i>	-	-	3%

Richesse spécifique

Le nombre d'espèces végétales aquatiques relevées est le plus souvent nulle dans les mares inventoriées (30 sur 37) (figure 11). Ce nombre s'élève toutefois jusqu'à 11 dans l'une d'elle, la mare ConcG (Bern) (figure 10).



Figure 10 : Mare ConcG (Bern) présentant le plus grand nombre d'espèces végétales aquatiques parmi les 37 mares inventoriées en juin 2021

Structure de la végétation

En lien direct avec ce qui vient d'être évoqué, on peut noter que seule une très faible proportion des mares possède une végétation aquatique (7 sur 37) (figures 11 et 12), contrairement à celle terrestre présente dans plus de la moitié d'entre elles (21 sur 37) (figure 12). Parmi la végétation aquatique de ces 7 mares, les hélophytes sont présentes bien plus fréquemment que les hydrophytes, qui n'ont été relevées que dans les deux mares ConcG (Bern) et Sonnex (Genève). Les hydrophytes libres sont même absentes. Par ailleurs, des plantes aquatiques ont parfois été implantées artificiellement.

En outre, le recouvrement par la végétation (aquatique et/ou terrestre) est très faible à l'intérieur des mares, ce qui contraste avec la zone riveraine les entourant (bande de 50 cm de large), qui est bien plus souvent végétalisée et avec un recouvrement plus dense (figure 13). Le détail de ces données est présent dans l'annexe 1.

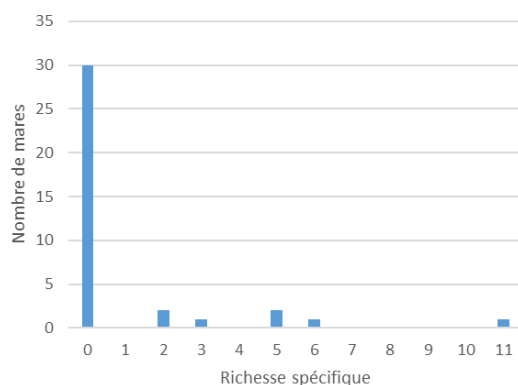


Figure 11 : Fréquence de la richesse spécifique en espèces végétales aquatiques dans les 37 mares en juin 2021

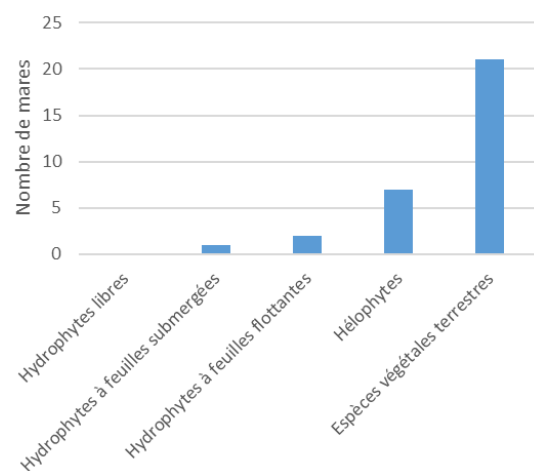


Figure 12 : Fréquence de présence des différents types de végétation dans les 37 mares en juin 2021

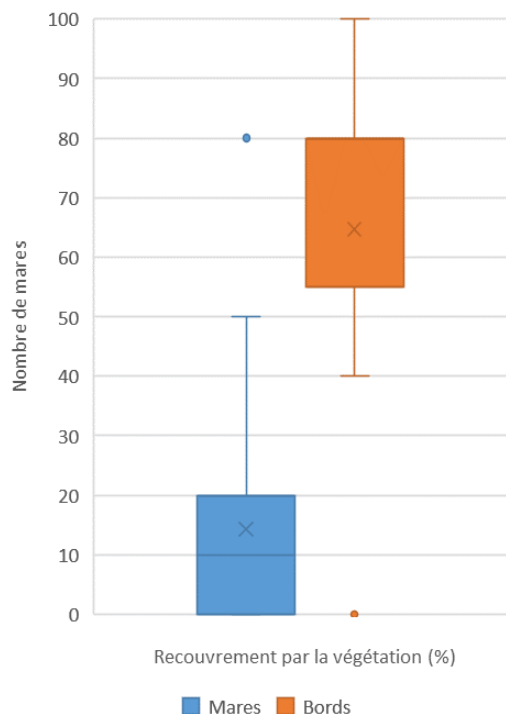


Figure 13 : Comparaison du pourcentage de recouvrement végétal entre l'intérieur des 37 mares et leurs zone riveraine (bande de 50 cm de largeur les entourant) en juin 2021

Paramètres de l'environnement liés à la présence de la végétation aquatique

En raison du nombre très restreint de mares possédant une végétation aquatique, et présentant de ce fait une richesse spécifique en espèces végétales aquatiques non nulle, aucune analyse statistique tentant de lier la présence de végétation aquatique ou la richesse spécifique aux paramètres de l'environnement ne peut être envisagé, car les conclusions qui en découleraient ne seraient pas statistiquement significatives.

4.2. Macroinvertébrés aquatiques

Liste des taxons

En tout, 28 taxons de macroinvertébrés aquatiques répartis dans 17 familles et 7 grands groupes taxonomiques ont été capturés dans les 37 mares inventoriées en juin 2021 (tableau 4). A ceux-ci s'ajoute des observations visuelles, permettant de préciser certains d'entre eux et d'élever ces nombres à 31 taxons et 18 familles dans toujours 7 grands groupes.

On remarque que la majorité des sept groupes taxonomiques auxquels appartiennent les macroinvertébrés aquatiques capturés contiennent principalement des espèces pouvant voler au stade adulte, à l'exception des oligochètes (tableau 4). Parmi ces groupes, les diptères, les coléoptères et les odonates sont les trois les plus fréquemment présents, suivis des hétéroptères et des éphéméroptères (figure 14). Les oligochètes et les trichoptères sont quant à eux bien moins fréquents.

Presque tous ces taxons ayant été relevés au stade larvaire, cela confirme qu'ils se reproduisent dans ces mares (annexe 5). La présence d'exuvies pour certains ne peut cependant confirmer leur développement jusqu'au stade adulte, des mues se faisant aussi entre les différents stades larvaires.

Parmi les espèces identifiées, aucune n'est menacée ou présente sur liste prioritaire en Suisse (Duelli, 1994 ; Gonseth, & Monnerat, 2002 ; Lubini, Knispel, Sartori, Vicentini, & Wagner, 2012 ; OFEV, 2019) (tableau 4).

On remarque aussi la présence de deux familles d'insectes piqueurs. Les bien connus moustiques (*Culicidae*), qui ne sont présents que dans deux mares genevoises (Fenic et LullC) en abondance moyenne, et les *Ceratopogonidae*, qui sont présents de façon bien plus fréquentes mais en abondance généralement moindre (figure 15 et annexe 5). Il est à noter que parmi les *Culicidae*, aucun moustique tigre n'a été relevé.

Richesse

La richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) relevées dans chacune des mares se situe majoritairement entre 0 et 4, avec un maximum de 10 familles capturées dans la mare BITGE (sans compter les familles remarquées uniquement par observation) (figure 16 et annexe 5).

Tableau 4 : Liste des macroinvertébrés aquatiques relevés, classés par familles et groupes taxonomiques, avec leur statut de menace en Suisse et leur fréquence de présence dans les 37 mares en juin 2021

Taxon	Stade de développement	LR	LP	Fréquence de présence
Captures standardisées				
Coleoptera	adulte et larve			49%
Dytiscidae	adulte et larve			30%
Colymbetinae	larve	-	-	11%
<i>Hydroglyphus geminus</i>	adulte	LC	-	16%
Hydroporinae	adulte et larve	-	-	22%
Hydrophilidae	adulte et larve			22%
<i>Helophares lividus</i>	adulte	LC	-	3%
<i>Helophorus cf. grandis</i>	adulte	LC	-	3%
<i>Helophorus cf. brevipalpis</i> sp.	adulte	LC	-	3%
<i>Helophorus flavipes</i> ou <i>obscurus</i>	adulte	LC	-	3%
<i>Helophorus</i> sp.	adulte	LC	-	14%
Diptera	larve et nymphe			68%
Ceratopogonidae	larve	-	-	30%
Chironomidae	larve et nymphe	-	-	57%
Culicidae	larve	-	-	5%
Stratiomyidae	larve	-	-	3%
Tipulidae	larve	-	-	3%
Ephemeroptera	larve			19%
Baetidae	larve			16%
<i>Cloeon dipterum</i>	larve	LC	-	16%
Caenidae	larve			5%
<i>Caenis cf. luctuosa</i>	larve	LC	-	3%
<i>Caenis luctuosa</i>	larve	LC	-	3%
Heteroptera	adulte et larve			22%
Corixidae	adulte et larve	-	-	11%
Gerridae	adulte et larve			14%
<i>Gerris</i> sp.	adulte et larve	LC	-	14%
Notonectidae	larve	-	-	11%
Odonata	larve			32%
Aeshnidae	larve			16%
<i>Aeshna cyanea</i>	larve	LC	-	3%
Coenagrionidae	larve	-	-	8%
Libellulidae	larve			22%
<i>Libellula quadrimaculata</i>	larve	LC	-	3%
<i>Orthetrum cancellatum</i>	larve	LC	-	3%
<i>Orthetrum cf. brunneum</i>	larve	LC	-	3%
<i>Sympetrum striolatum</i>	larve	LC	-	3%
<i>Sympetrum</i> sp.	larve	-	-	14%
Oligochaeta	-	-	-	8%
Trichoptera	larve			3%
Hydroptilidae	larve	-	-	3%
Observations supplémentaires				
Diptera	adulte et larve			5%
Culicidae	adulte et larve			5%
<i>Culex</i> sp.	adulte et larve	-	-	5%
Heteroptera	adulte et larve			5%
Gerridae	adulte et larve			5%
<i>Gerris</i> sp.	adulte et larve	LC	-	5%
Odonata	adulte et larve			24%
Aeshnidae	larve			3%
<i>Anax</i> sp.	larve	LC	-	3%
Coenagrionidae	adulte			24%
<i>Coenagrion puella</i>	adulte	LC	-	14%
<i>Coenagrion cf. puella</i>	adulte	LC	-	11%
<i>Ischnura elegans</i>	adulte	LC	-	3%
Corduliidae	adulte			3%
<i>Cordulia aenea</i>	adulte	LC	-	3%
Libellulidae	adulte			8%
<i>Libellula quadrimaculata</i>	adulte	LC	-	8%

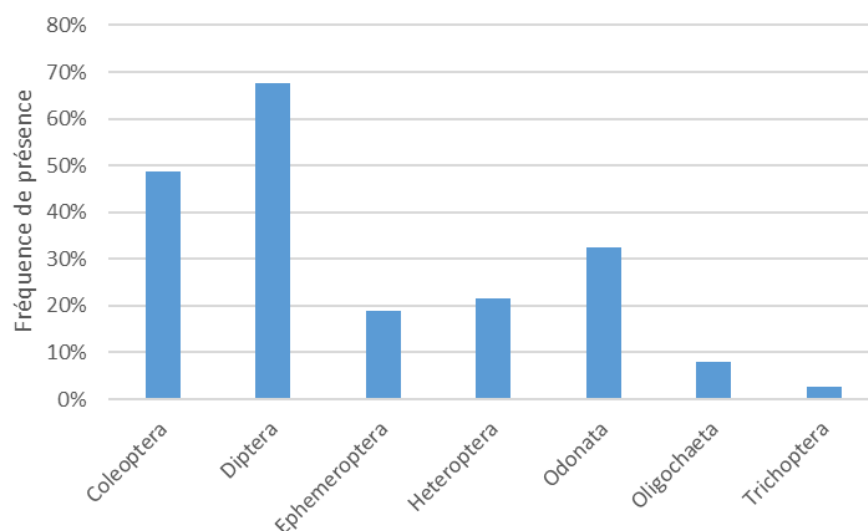


Figure 14 : Fréquence de présence des groupes taxonomiques de macroinvertébrés aquatiques capturés dans les 37 mares en juin 2021

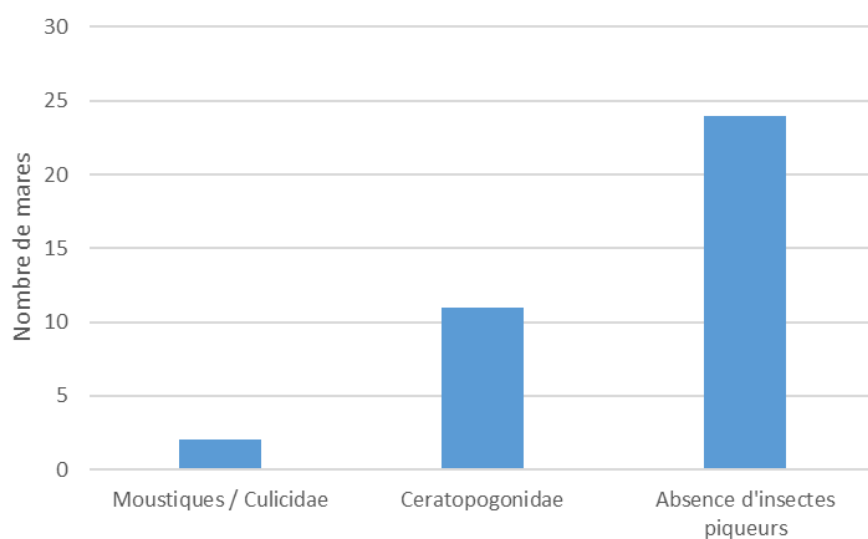


Figure 15 : Fréquence de présence des *Culicidae* (moustiques) et *Ceratopogonidae* capturés dans les 37 mares en juin 2021

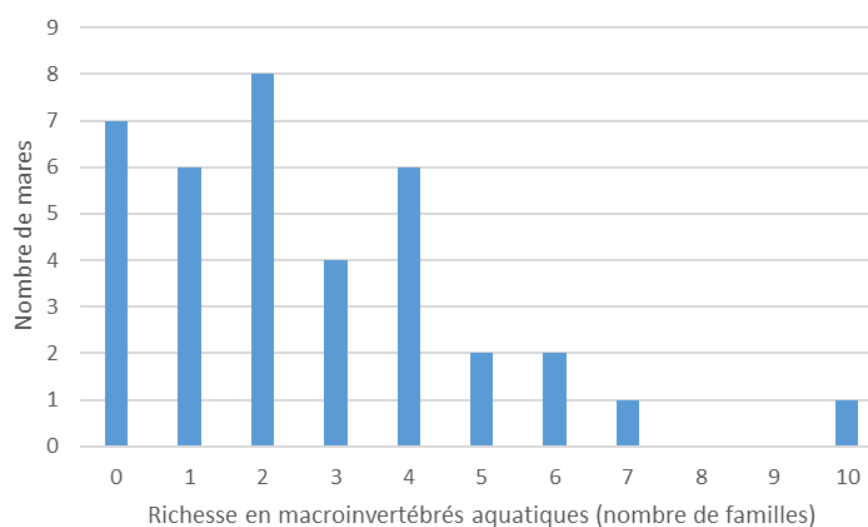


Figure 16 : Fréquence de la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) capturés dans les 37 mares en juin 2021

Richesse cumulée des mares de Gossau (Saint-Gall)

Une dizaine de mares se situant sur la même toiture à Saint-Gall (Gossa1 à Gossa10, Gossa11 se trouvant sur un toit voisin), il a été jugé pertinent d'évaluer si elles sont complémentaires pour favoriser la richesse en macroinvertébrés aquatiques. En cumulant leurs nombres de familles (de façon lissée en utilisant EstimateS), on remarque que la richesse cumulée augmente de façon assez régulière pour les six premières mares, puis légèrement en ajoutant les quatre dernières (figure 17). Ceci traduit que ces mares ont beaucoup de familles en commun, mais que chacune participe à la richesse cumulée du groupe (tableau 5). Cette richesse de 10 familles est en effet de moitié plus élevée que la richesse maximale de 7 trouvée parmi ces mares (tableau 5 et annexe 5), ce qui démontre l'intérêt d'avoir plusieurs mares sur la même toiture. La relative stabilisation à 10 familles montre également que la perte d'une ou deux mares n'affecterait pas cette richesse. Ce constat est accentué par le fait que les quatre mares présentant les richesses les plus élevées hébergent la totalité des familles trouvées (tableau 5). La richesse réelle estimée de ce groupe de 10 mares au 11 juin 2021 est de 11,8 familles de macroinvertébrés aquatiques, ce qui signifie qu'une ou deux familles ont potentiellement été manquées lors des captures.

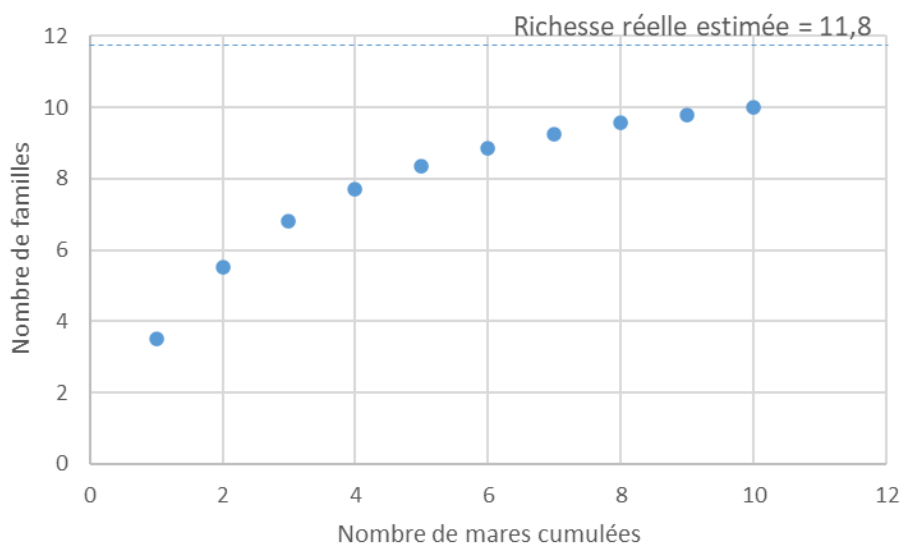


Figure 17 : Courbe d'accumulation de la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) capturés dans les 10 mares de Saint-Gall situées sur la même toiture le 11 juin 2021

Tableau 5 : Répartition des familles de macroinvertébrés aquatiques capturées dans les 10 mares de Saint-Gall situées sur la même toiture le 11 juin 2021

Mare	Chironomidae	Libellulidae	Aeshnidae	Hydrophilidae	Ceratopogonidae	Gerridae	Baetidae	Notonectidae	Corixidae	Dytiscidae	Richesse (nombre de familles)
Gossa7											7
Gossa4											6
Gossa5											4
Gossa8											4
Gossa1											3
Gossa6											3
Gossa10											3
Gossa2											2
Gossa3											2
Gossa9											1

4.3. Autres groupes faunistiques

Aucun amphibien n'a été aperçu lors des inventaires, et ce groupe n'est donc pas abordé dans les analyses (annexe 1).

La présence de poissons a été relevée dans deux mares (annexe1). Il s'agit de carpes, *Cyprinus carpio carpio* (Linnaeus, 1758), qui ont apparemment été introduites dans un but esthétique. Beaucoup d'alevins ont été remarqués dans la mare ConG (Bern), et 5 adultes ont été observés et un alevin capturé dans la mare Sonnex (Genève) (figure 18 et annexe 5). Les poissons représentent souvent une menace pour les macroinvertébrés aquatiques (Tachet, Richoux, Bournaud, & Usseglio-Polatera, 2002), mais le nombre de mares concernées est cependant trop faible pour pouvoir intégrer ce paramètre à des analyses statistiques.

Du zooplancton crustacé a été capturé dans vingt mares (annexe 5). Il n'est pas intégré à des analyses statistiques, car la méthode d'inventaire ne prévoyait pas qu'il soit relevé.

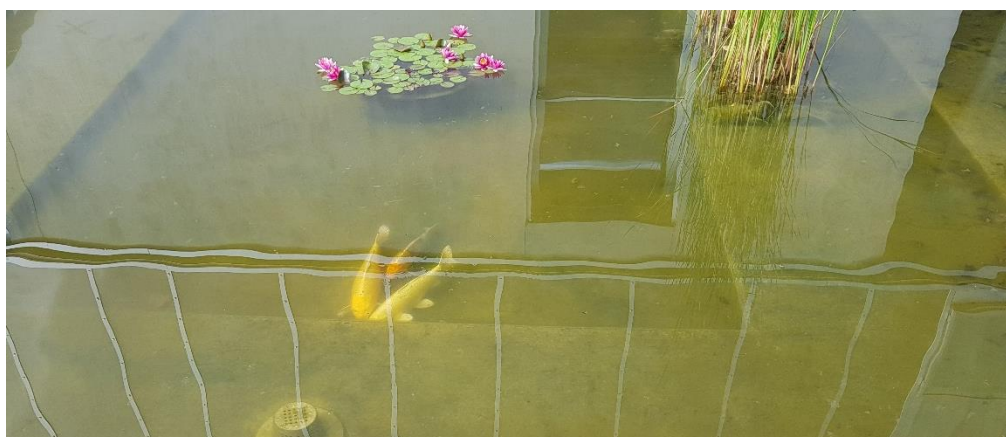


Figure 18 : Poissons (carpes) présents dans la mare Sonnex à Genève, 21 juin 2021

4.4. Paramètres de l'environnement liés à la présence des macroinvertébrés aquatiques

Corrélation entre la richesse et la surface

Les mares sur toits ayant une surface plus importante ont tendance à héberger une richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) plus élevée ($R^2 = 0,28$), comme le montre la courbe de régression linéaire positive sur le graphique ci-dessous (figure 19). Ainsi une mare de 2 m² héberge 2 familles, une de 20 m² 3,5 familles et une de 200 m² 5 familles. Cette relation est statistiquement significative ($p = 0,001 < 0,05$).

Corrélation entre la richesse et la profondeur

Souvent en lien avec la surface, la profondeur moyenne des mares a également une influence positive sur la richesse, mais toutefois moins prononcée ($R^2 = 0,14$) (figure 20). Ainsi une mare de 5 cm de profondeur héberge 2 familles, une de 20 cm 3,5 familles et une de 40 cm 6 familles. Cette relation est statistiquement significative ($p = 0,024$).

Corrélation entre la richesse et le régime hydrologique

Certaines mares étant assec et aucun macroinvertébré aquatique n'ayant été relevé dedans en juin 2021, il a été supposé que le régime hydrologique avait une influence importante sur leur richesse. Ceci est effectivement le cas de façon marquée ($R^2 = 0,39$) : plus la période en eau d'une mare est longue, plus le nombre de familles qu'elle héberge est élevé (figure 21). Ainsi une mare rarement en eau n'héberge aucune famille, alors qu'une mare permanente en héberge près de 6. Cette relation est également statistiquement significative ($p < 0,001$).

Corrélation entre la richesse et la présence de végétation

Les mares inventoriées présentant une couverture végétale (végétation aquatique et/ou terrestre) plus étendue semblent héberger une richesse plus élevée (figure 22). Mais ce constat est fragile ($R^2 = 0,09$), et les quatre mares hébergeant le plus de familles se situent entre 20% et 30% de recouvrement par la végétation. Cette relation n'est pas statistiquement significative ($p = 0,079 > 0,05$).

Corrélation entre la richesse et la hauteur de la toiture

Une des principales caractéristiques des mares étudiées est d'être situées sur des toits. Il semble que plus l'éloignement par rapport au sol est important, moins le nombre de familles de macroinvertébrés aquatiques est élevée ($R^2 = 0,08$) (figure 23). Cette relation n'est toutefois pas statistiquement significative ($p = 0,090$).

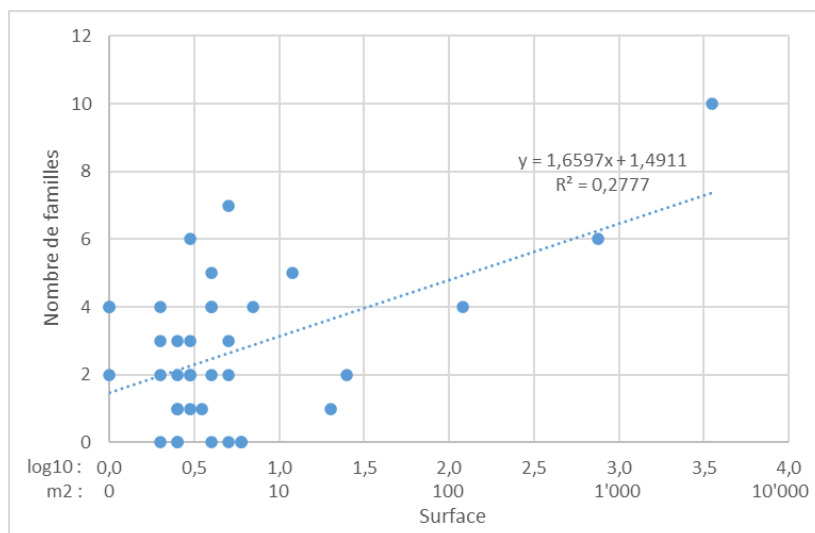


Figure 19 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction de la surface des 37 mares en juin 2021

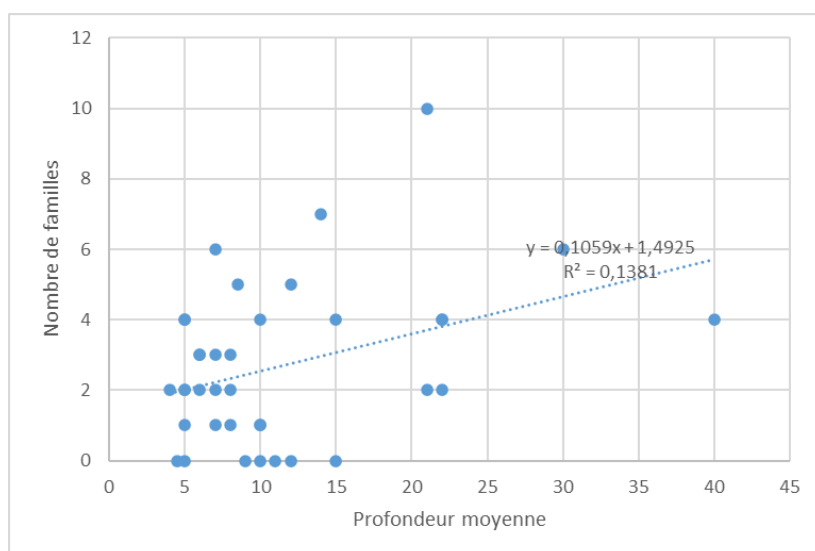


Figure 20 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction de la profondeur des 37 mares en juin 2021

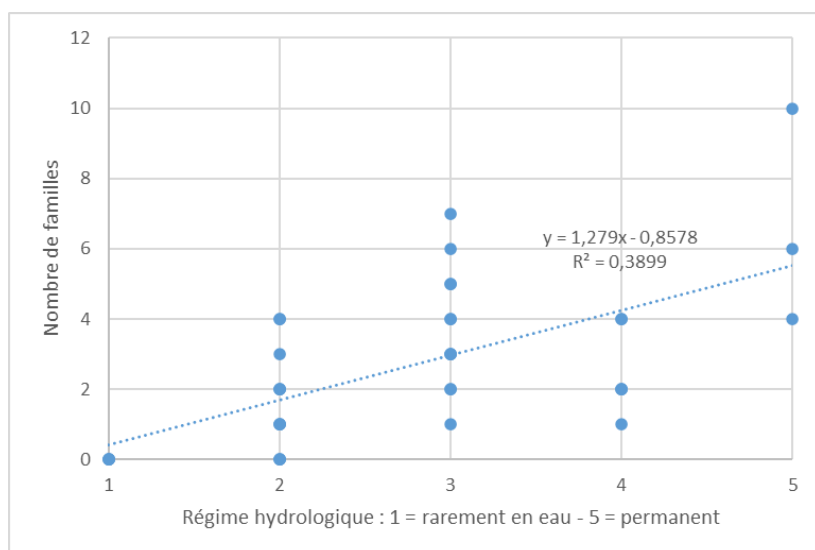


Figure 21 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction du régime hydrologique des 37 mares en juin 2021

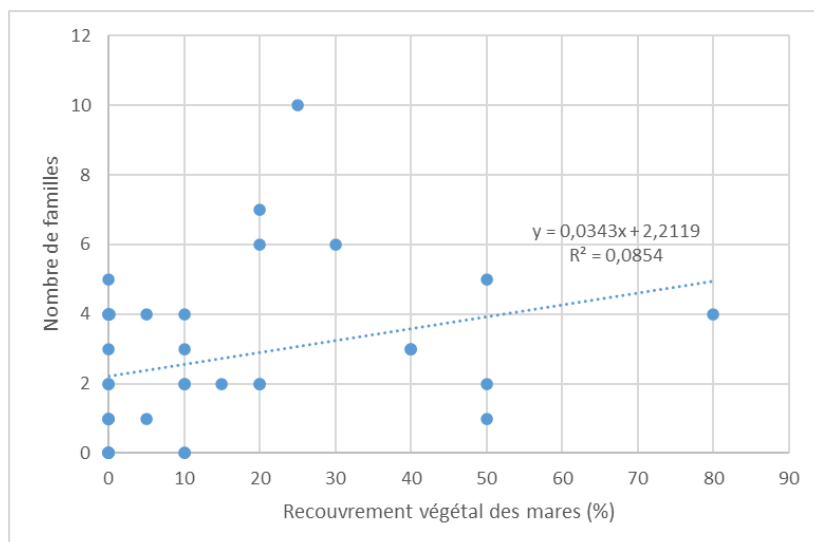


Figure 22 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction de la couverture végétale des 37 mares en juin 2021

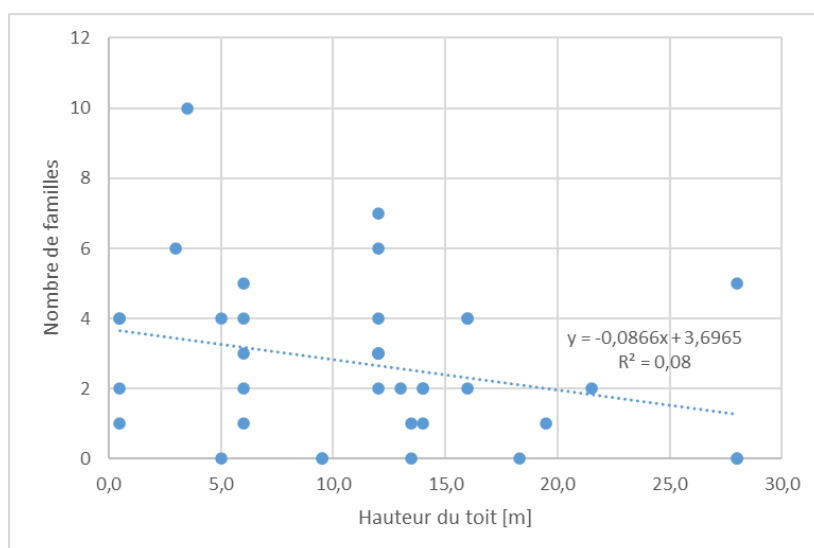


Figure 23 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction de la hauteur du toit des 37 mares en juin 2021

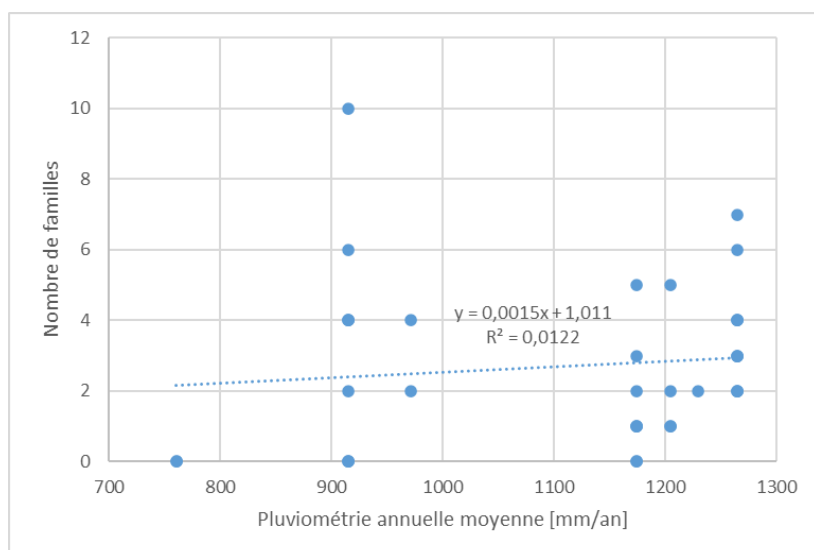


Figure 24 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction de la pluviométrie (moyenne annuelle entre 1980 et 2020) des 37 mares en juin 2021

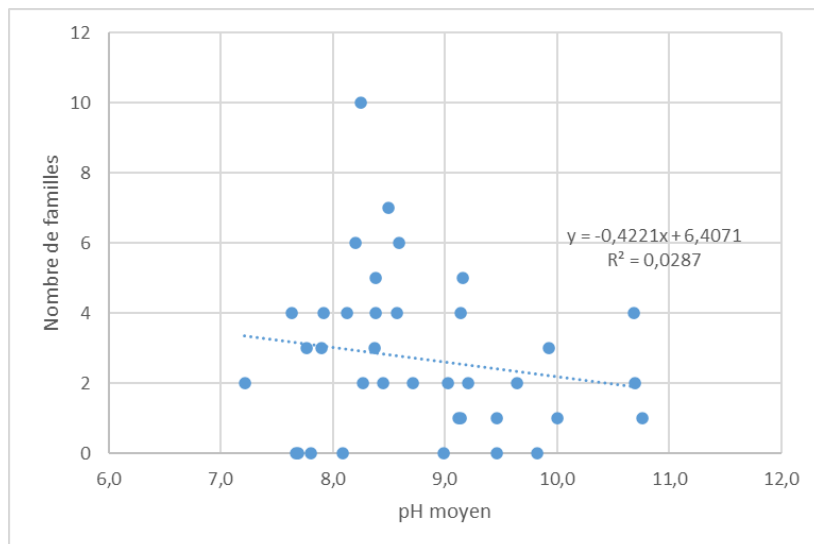


Figure 25 : Richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction du pH de l'eau des 37 mares en juin 2021

Modélisation liant la richesse en macroinvertébrés aquatiques aux paramètres de l'environnement

Il apparaît après modélisation que les trois paramètres de l'environnement ayant le plus d'influence sur la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) sont le régime hydrologique, la surface et la pluviométrie annuelle moyenne, avec une relation positive (figure 26). Ces trois variables expliquent en effet à elles seules à 49,45% la variabilité de la richesse relevée dans les 37 mares. Il est toutefois important de noter que la corrélation hors modèle entre richesse et pluviométrie est faible ($R^2 = 0,01$) (figure 24) et n'est pas du tout statistiquement significative (0,516).

En augmentant le degré de tolérance (alpha pour inclure de 0,25 et non 0,1), on s'aperçoit que le pourcentage de recouvrement des mares par la végétation, le pH moyen de l'eau et la hauteur de la toiture ont également une influence sur la richesse, positive pour la végétation et négative pour les deux autres (figure 27). Toutefois, l'influence de ces variables supplémentaires est largement moindre, puisqu'elles n'expliquent qu'à moins de 13 % la variabilité de la richesse relevée ($R^2 = 62,46\% - 49,45\%$), et que leur degré de corrélation hors modèle avec cette richesse est relativement faible autant pour la végétation ($R^2 = 0,09$ et $p = 0,079$) que la hauteur ($R^2 = 0,08$ et $p = 0,090$) et surtout le pH ($R^2 = 0,03$ et $p = 0,316$) (figure 25). La diversité en micro-habitats et la concentration maximale en cyanobactérie sont écartées, car leur valeur de p est largement supérieure à celle des autres paramètres dans le modèle (figure 27). Elles ont donc une bien plus faible significativité statistique.

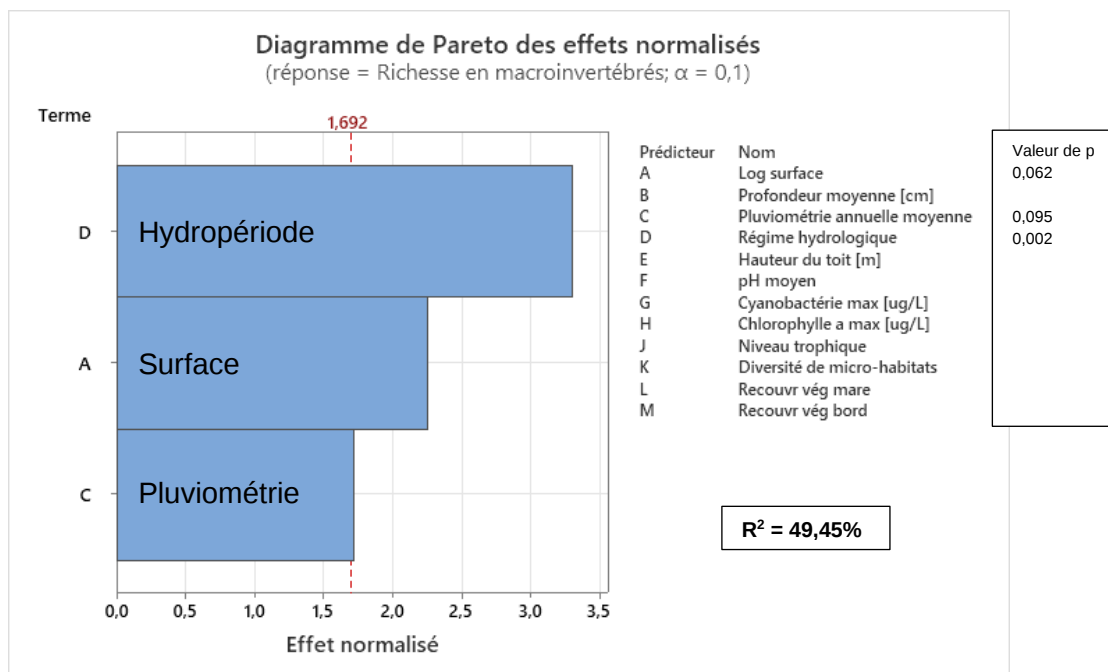


Figure 26 : Contribution des variables au modèle de régression pas à pas par sélection ascendante liant la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) des 37 mares en juin 2021 aux paramètres de l'environnement avec alpha pour inclure de 0,1

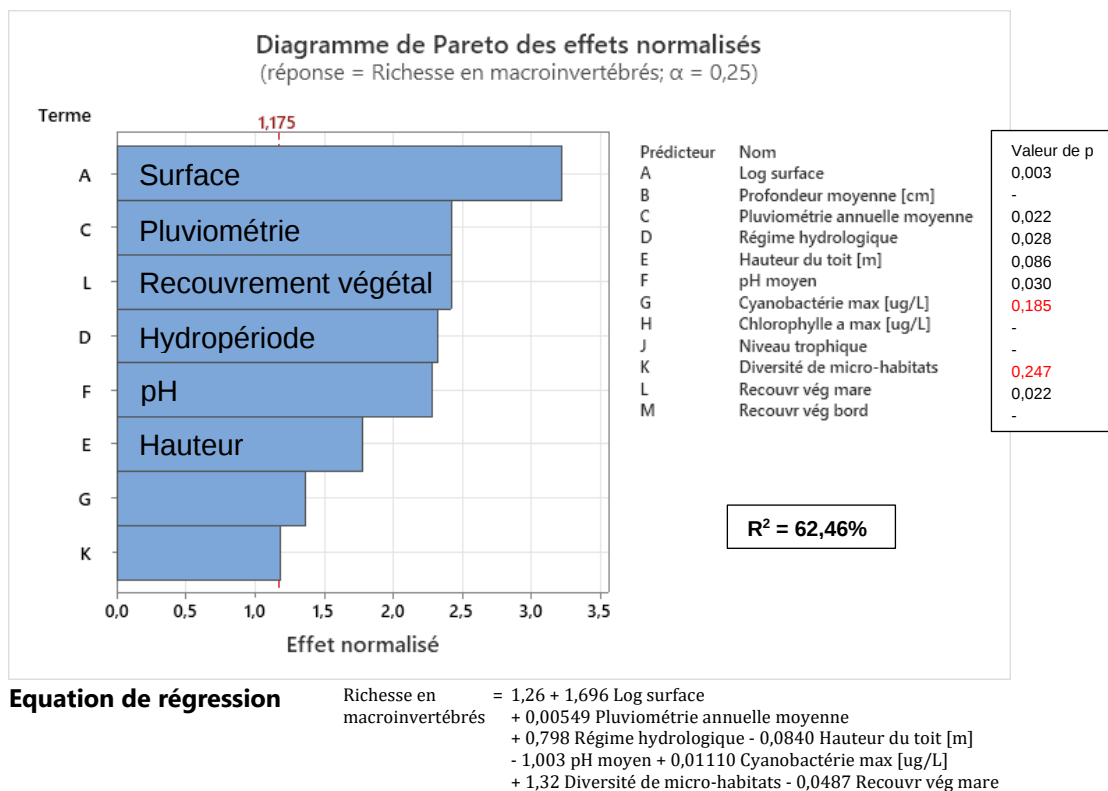


Figure 27 : Contribution des variables au modèle de régression pas à pas par sélection ascendante liant la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) des 37 mares en juin 2021 aux paramètres de l'environnement avec alpha pour inclure de 0,25

4.5. Biodiversité des mares sur toitures comparée à celle des mares au sol urbaines et rurales

Comparaison de la fréquence de présence des différents groupes taxonomiques

Neuf groupes taxonomiques ont été relevés dans 81 mares au sol à Genève, à savoir les gastéropodes, les bivalves, les crustacés, les coléoptères, les odonates, les éphéméroptères, les plécoptères, les trichoptères, et la végétation aquatique (données du projet MARVILLE de 2012 et 2013). On constate tout d'abord que tous les groupes sans exception sont présents moins fréquemment dans les mares sur toits que dans celles au sol (figure 28). On remarque ensuite la présence de crustacés (10%) et surtout de mollusques aquatiques (bivalves (25%) et gastéropodes (65%)) dans les mares au sol, alors qu'ils sont absents de celles sur toits. Les trichoptères et éphéméroptères sont quant à eux présents bien plus fréquemment dans les mares au sol (30% et 70%) que dans celles sur toits (5% et 20%), tout comme la végétation aquatique avec 85% au sol contre 20% sur toit. Le constat est proche pour les odonates avec 65% au sol contre 30% sur toit. Les coléoptères aquatiques sont le seul groupe à être presque tout aussi présent dans les deux avec 60% au sol et 50% sur les toits.

Les oligochètes et les hétéroptères aquatiques ne peuvent malheureusement pas être comparés, car ces deux groupes n'ont pas été relevés dans les mares au sol. Il en va de même pour les diptères, car la famille des *Chironomidae* n'a pas été relevée dans les mares au sol.

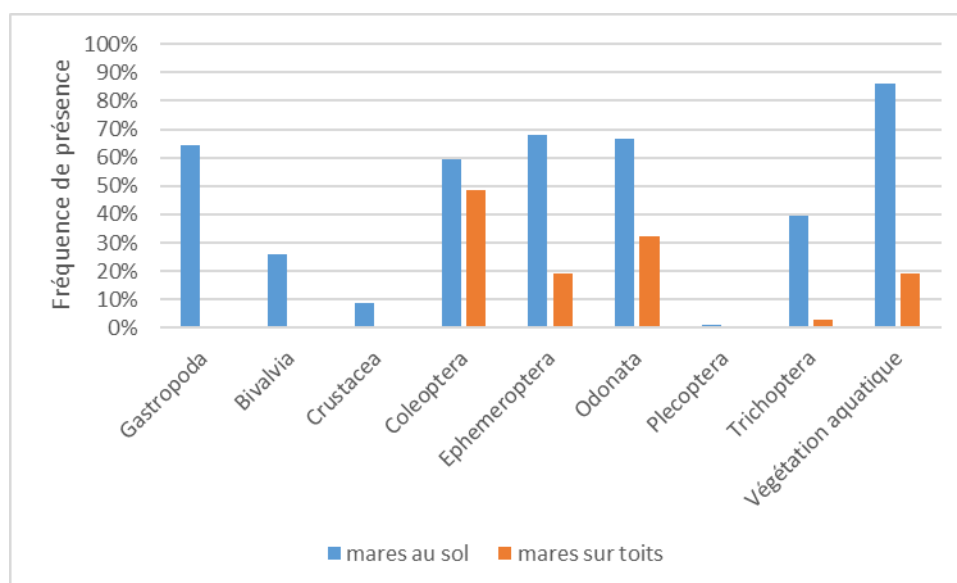


Figure 28 : Comparaison de la fréquence de présence de différents groupes taxonomiques entre 81 mares au sol genevoises (2012-2013) et les 37 mares sur toits (juin 2021)

Comparaison de la richesse en macroinvertébrés aquatiques

En comparant la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) des mares sur toits avec celle de 60 mares au sol de basse altitude en Suisse (données du projet PLOCH entre 1996 et 2005), on s'aperçoit d'une nette différence entre les deux (figure 29). Avec une médiane de 2 familles, une moyenne de 3 et un maximum de 7, la richesse est en effet très nettement inférieure dans les mares sur toits. L'écart est tel que la valeur maximale observée de 10 familles dans les mares sur toits n'atteint pas la moitié de la médiane à 23,5 ou de la moyenne à 24,5 des mares au sol. En se basant sur ces deux valeurs, on constate que la richesse des mares au sol est entre 8 et 12 fois supérieure à celle des mares sur toits.

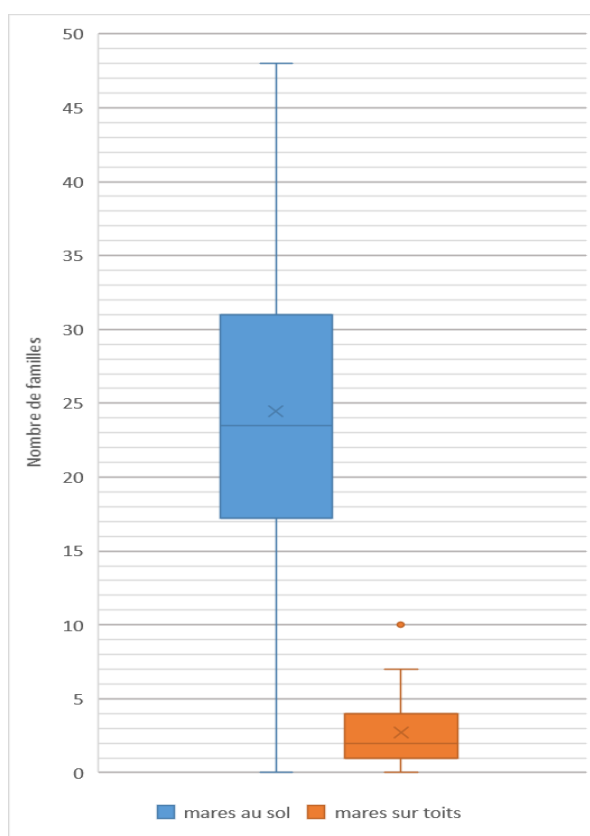


Figure 29 : Comparaison de la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) entre les mares au sol de basse altitude (<1000 [m.s.m.]) en Suisse (1996-2005) et les 37 mares sur toits (juin 2021)

En comparant l'évolution de la richesse des mares de ces deux groupes en fonction du logarithme en base 10 de leur surface, on remarque que c'est non seulement la richesse, mais également la surface des mares sur toits qui est généralement moins élevée (figure 30). On pourrait alors penser que les faibles richesses relevées dans les mares sur toits sont dues à leur surface moindre, mais comme démontré plus haut d'autres paramètres entrent en ligne de compte, et cela se vérifie ici par l'écart entre les deux courbes de régression linéaires, qui montre que les mares au sol possèdent globalement une richesse 4 fois plus élevée en tenant compte de la surface.

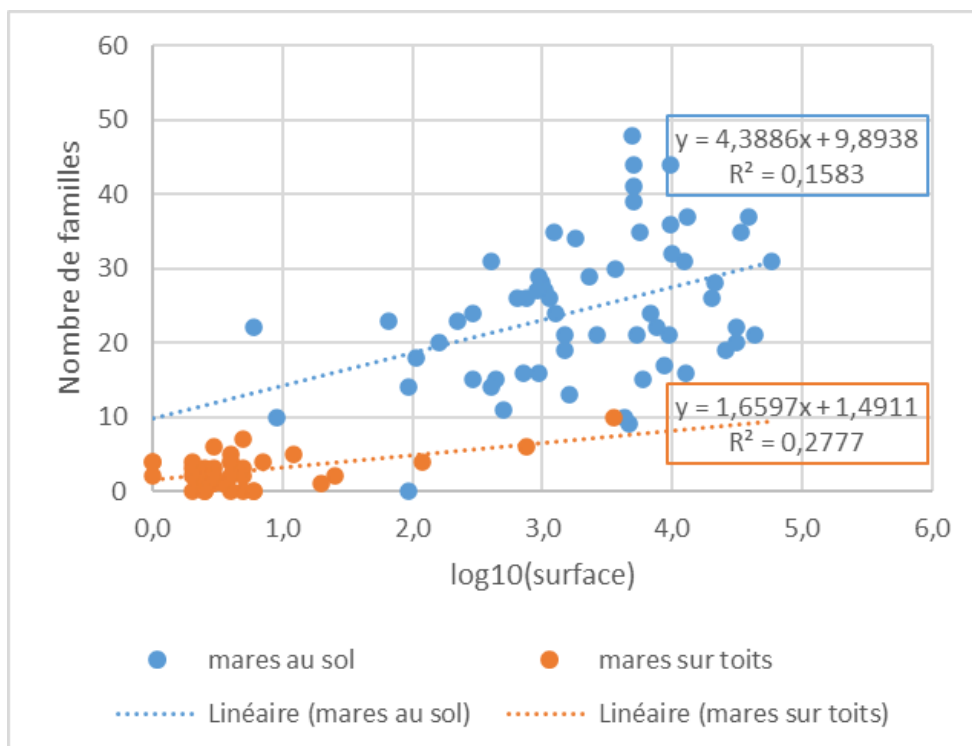


Figure 30 : Comparaison de la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) en fonction de la surface entre les mares au sol de basse altitude (<1000 [m.s.m.]) en Suisse (1996-2005) et les 37 mares sur toits (juin 2021)

5. Discussion

Les résultats obtenus confirment la présence d'espèces animales et végétales vivant et se reproduisant dans les mares sur toits, ces mares hébergent donc une biodiversité. Celle-ci est toutefois bien plus faible que dans les mares au sol (figure 29). Les raisons de cet écart sont liées aux paramètres environnementaux qui les caractérisent.

Une des principales caractéristiques des mares sur toits est leur surface généralement réduite (figures 6 et 30). Or, une forte corrélation entre la surface et la richesse en macroinvertébrés a été relevée (figures 19 et 26). En effet, plus un milieu est petit, moins le nombre d'espèces pouvant y cohabiter est élevé, et l'importance de cette corrélation a déjà été relevée pour les mares au sol (Oertli & Parris, 2019).

Une autre caractéristique est leur faible profondeur moyenne, mais ce facteur ne semble pas avoir d'importance particulière pour la richesse en macroinvertébrés dans les mares sur toits (figure 27), malgré une relation statistiquement significative ($p = 0,024$). Ce constat est en légère opposition avec ce qui a pu être constaté dans les mares au sol, où l'influence positive de la profondeur a été relevée pour certains groupes, principalement les odonates (Frossard & Oertli, 2015). Ceci explique probablement en partie leur présence moindre dans les mares sur toits (figure 28).

Un paramètre prépondérant de ces plans d'eau est leur temporalité (figure 26). Etant donnée que le cycle de vie de toute espèce aquatique dépend directement de la présence d'eau, leur nombre sera nécessairement réduit si les mares sont trop souvent assec. Un lien fort a en effet été relevée entre les deux (figure 21). Ceci concerne les espèces ayant des cycles de vie complet dans l'eau et ne pouvant se déplacer dans une autre mare en cas d'assec, comme les macro-crustacées, qui sont absents des mares inventoriés (figure 28), ou les oligochètes, très peu présents (figure 14). Des micro-crustacés ont tout de même été fréquemment relevés, car ils ont un cycle de vie court et leurs œufs résistent à la dessiccation (Oertli & Frossard, 2013). Mais la quasi-totalité des groupes de macroinvertébrés relevés pouvant se déplacer hors de l'eau au stade adulte, la corrélation s'explique par le temps de maturation des larves, qui sont essentiellement aquatiques. Certains diptères peuvent se développer en une dizaine de jours en été et sont présents dans 70% des mares, alors que les odonates, éphéméroptères et trichoptères ont un stade larvaire long (pour beaucoup de 8 à 10 mois) et ne sont présents que dans 5% à 30% d'entre elles (Espace pour la vie, 2021 ; Oertli & Frossard, 2013) (figure 14).

La pluviométrie annuelle moyenne présente également un lien avec la richesse en macroinvertébrés (figure 26), ceci probablement parce que plus elle est élevée moins une mare a de risque d'être asséchée, mais aussi parce que la pluie diminue la conductivité de l'eau des mares en diluant les ions en solution, rendant ces milieux moins hostiles pour les organismes aquatiques.

La densité de recouvrement de la mare par la végétation a également une influence sur la richesse en macroinvertébrés (figures 22 et 27). La végétation peut en effet servir d'abris à toute espèce, de support de ponte ou d'émergence à certaines (plusieurs espèces d'odonates par exemple), et de nourriture aux organismes herbivores (Oertli & Frossard, 2013). Elle reste cependant rare dans les mares sur toits, en particulier la végétation aquatique (figures 11, 12 et 13), ce qui contraste avec les mares au sol (figure 28). Ceci permet de définir ces milieux comme pionniers, caractéristique probablement maintenue par les assecs réguliers créant de grands écarts de conditions difficiles à supporter pour la plupart des espèces. Cependant, aucune corrélation statistiquement significative n'a pu être établie entre le régime hydrologique et la présence de végétation aquatique dans le cadre de ce travail, en raison du nombre trop faible de mares en possédant une. Cette faible présence pourrait en effet également être liée à d'autres paramètres, comme l'absence presque complète de substrat dans ces mares, facteur qui présente malheureusement lui aussi une occurrence trop faible pour que son influence puisse être vérifiée statistiquement.

Une caractéristique propre aux mares étudiées est d'être situées sur des toitures. Cette séparation du sol se traduit par une réduction de l'accessibilité du milieu pour plusieurs groupes taxonomiques et donc par une diminution de la richesse (figures 23 et 27). On note par exemple l'absence de mollusques aquatiques (figure 28) (et d'amphibiens (annexe 1)), qui sont peu mobiles, se déplacent au sol, et devraient traverser des milieux anthropiques hostiles pour parvenir jusqu'à la mare, y compris la toiture elle-même qui est généralement un milieu xérothermique (figure 31). Tout comme les crustacés, ce groupe peut bénéficier et nécessite du transport par une autre espèce pour rejoindre la mare (essentiellement les oiseaux) (Tachet et al., 2002), encore faut-il qu'elle soit en eau pour pouvoir y subsister. Ce point concerne apparemment également les oligochètes, qui comme les crustacés ne peuvent se déplacer hors de l'eau, mais qui ont tout de même été trouvés dans certaines mares (figure 14). Par opposition, les coléoptères et diptères aquatiques sont bien représentés, car ils possèdent de bonnes capacités de vol et de dispersion et sont adaptés aux milieux temporaires (Tachet et al., 2002).



Figure 31 : Milieu xérothermique entourant la mare Hive, typique des toitures végétalisées extensives répandues en Suisse, mais hostile aux organismes aquatiques, 21 juin 2021

Complémentarité

Un dernier point à aborder est le fait que les mares inventoriées sont souvent seules sur leur toiture, parfois deux ou trois. En s'intéressant à la richesse cumulée du groupe de dix mares situées sur la même toiture à Saint-Gall, on s'aperçoit qu'elle est nettement plus élevée que celle de chacune des mares prise isolément (figure 17, tableau 5 et annexe 5). Ceci s'explique par le fait qu'elles présentent toutes des caractéristiques et donc des espèces légèrement différentes, mais probablement aussi parce qu'un équilibre différent a été trouvé entre ces espèces dans chacune d'elle. Avoir plusieurs mares sur une même toiture est donc favorable aux macroinvertébrés aquatiques et à la biodiversité.

6. Propositions pour l'aménagement et la gestion de mares sur les toitures

Surface importante

Sur la base des résultats obtenus, une première recommandation pouvant être faite est d'augmenter la surface des mares sur toits pour accroître la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) qu'elles hébergent (figures 19 et 26). Les trois quarts faisant actuellement moins de 5 m² (figure 6), il serait bien de privilégier l'aménagement de mares ayant une surface supérieure à celle-ci.

Période en eau étendue

Le régime hydrologique est central pour la richesse en macroinvertébrés (figures 21 et 26), car seules les espèces ayant des cycles de vie y étant adaptés pourront s'y développer. La majorité des mares sur toits étant actuellement temporaires, il est conseillé d'augmenter la proportion de mares permanentes. Dans ce but, la mesure la plus pertinente serait d'augmenter artificiellement la pluviométrie, qui est corrélée à cette richesse (figures 26). On peut procéder en installant un tuyau et en alimentant régulièrement la mare avec de l'eau du réseau. Mais des restrictions d'utilisation pouvant être mises en place lors de sécheresse, il est préférable de stocker l'eau de pluie de la toiture ou d'utiliser l'eau d'un lac à proximité (comme c'est le cas pour la mare BITGE (annexe 1)). Autrement, la réserve hydrique d'une mare peut être majorée en augmentant son volume, et donc sa profondeur et sa surface, limitant ainsi directement le risque d'assec.

Un point à mentionner en faveur d'une période en eau plus longue est que les deux familles d'insectes piqueurs relevés ont un stade larvaire court (Oertli & Frossard, 2013). Allonger la période en eau d'une mare aura donc tendance à favoriser sa colonisation par d'autres groupes au développement plus lent, dont certains prédateurs comme les libellules, ce qui diminuera le nombre de moustiques et *Ceratopogonidae*, et ce faisant le disservice qu'ils représentent.

Végétalisation et compromis

La richesse en macroinvertébrés est également influencée par le pourcentage de recouvrement de la mare par la végétation (figures 22 et 27). Toutes les espèces végétales relevées possédant un système racinaire (annexe 4), il est légitime de penser qu'elles ont besoin d'un substrat pour se développer, bien que ce lien n'ait pu être démontré dans le cadre de cette étude en raison de l'absence trop fréquente de substrat dans les mares sur toits. Cependant, augmenter l'épaisseur de substrat signifie diminuer

la profondeur de la mare ou augmenter le poids exercé sur le toit (si la profondeur est conservée). Par ailleurs, si du substrat est présent, il est nécessaire d'augmenter la quantité d'eau alimentant la mare pour maintenir un régime hydrologique favorable aux macroinvertébrés, le substrat devant être saturé pour que la mare soit en eau. Le meilleur compromis serait donc d'aménager des îlots ou des bacs dans la mare, afin d'y permettre la présence de végétation sans avoir besoin d'une alimentation supplémentaire pour conserver la même période en eau. C'est le cas des mares BITGE, Sonnex, GemB, GemH et Gossa2 (figure 32 et annexe 1). Une autre solution serait de laisser pousser sur les bords une végétation tombant dans la mare, comme c'est le cas pour plusieurs mares de Gossau (annexe 1).

Une proposition combinant celles apportées pour les trois paramètres environnementaux déjà abordés, serait d'aménager une toiture végétalisée avec un gradient d'épaisseur de substrat diminuant depuis chaque côté vers le centre du toit. Cela permettrait en effet à la fois d'augmenter au maximum la surface de la mare, de capter toute l'eau de pluie du toit dans la mare et de permettre l'implantation de végétation dans celle-ci.



Figure 32 : Mare GemH aménagée avec un bac et de nombreux îlots recouverts de végétation, 10 juin 2021

Rapprocher le toit du sol

Le dernier paramètre analysé présentant une corrélation avec la richesse en macroinvertébrés est la hauteur de la toiture (figures 18 et 20). Celle-ci n'est certes pas modifiable sur un bâtiment existant, mais elle peut être prévue lors de la conception d'un nouveau. Il existe par exemple des bâtiments sur des terrains en pente avec un toit plat

dont l'un des côtés est au contact du sol, comme pour les mares LullC, LullN, LullS et BostE (qui sont malheureusement bordées d'un muret). On peut autrement aménager une rampe (idéalement végétalisée) reliant le toit au sol. Une troisième possibilité serait de construire des bâtiments voisins avec différentes hauteurs de toits et une mare sur chacun d'eux, de façon à créer une sorte d'escalier pour diminuer l'écart de hauteur entre deux milieux favorables aux macroinvertébrés aquatiques.

Multiplicité et complémentarité

Afin d'éviter tout malentendu, il est important de préciser que ces recommandations ne visent pas à développer la mare sur toit idéale et ne sont donc pas à appliquer systématiquement de la même manière pour toutes les mares. Au contraire, elles ont pour but d'encourager à les diversifier, sur la base des informations récoltées sur les 37 inventoriées en juin 2021, et des corrélations mises en avant dans le cadre de ce travail entre la richesse en macroinvertébrés aquatiques et les paramètres de l'environnement de ces mares. En effet, c'est cette diversité de caractéristiques qui offre les conditions favorisant la présence d'un maximum d'espèces (Oertli & Parris, 2019 ; Zamora-Marín et al., 2021). Il est de ce fait recommandé de conserver des mares temporaires ou à caractère pionnier (particulièrement rares en Suisse), qui permettent la présence d'espèces souvent menacées supportant mal la concurrence ou une densité de végétation trop élevée. L'exemple de la richesse cumulée du groupe de mares de Gossau illustre bien ce message de complémentarité, mais également l'intérêt de multiplier le nombre de mares pour promouvoir la biodiversité, et ce y compris sur la même toiture. Ceci complète le réseau de milieux aquatiques et permet en outre à certaines espèces se trouvant dans une mare temporaire de se déplacer plus facilement vers une mare permanente en cas d'assec, puis de recoloniser celle-ci plus rapidement lorsqu'elle est à nouveau en eau.

Sensibilisation

Une dernière mesure pouvant être proposée pour promouvoir la biodiversité des mares sur toits est de sensibiliser la population à la problématique de la raréfaction des mares et des espèces qu'elles hébergent, en particulier auprès des propriétaires publics et privés (El Jai & Pruneau, 2015). Cela les fera prendre conscience de l'intérêt de multiplier ce type de plans d'eau, celles situées sur les toits présentant l'avantage de ne pas avoir d'emprise au sol. Le fait que peu d'organismes nuisibles aient été trouvées dans celles inventoriées (insectes piqueurs et néophytes invasives) est un argument de poids à mettre en avant.

7. Conclusion

7.1. Synthèse

La méthode développée et les données récoltées dans le cadre de ce travail ont permis de confirmer la présence d'espèces animales et végétales vivant et se reproduisant dans les mares sur toits. Elles sont toutefois moins nombreuses et moins fréquemment présentes que dans les mares au sol. Aucun amphibien n'a été relevé, et ces mares présentent peu de végétation aquatique. Plusieurs plantes aquatiques ont tout de même été trouvées, dont certaines potentiellement menacées et vulnérables. De plus, seule une mare héberge des néophytes invasives.

Concernant les macroinvertébrés aquatiques, une trentaine de taxons de 18 familles ont été relevés. Ces taxons sont presque tous présents au stade larvaire, et se reproduisent donc dans ces mares. Les groupes taxonomiques les plus fréquemment présents ont de bonnes capacités de vol et sont généralement adaptés aux mares temporaires. Aucune espèce relevée n'est menacée. Des insectes piqueurs ne sont présents que dans une minorité de mares et en nombre d'individus restreint.

Les principaux paramètres environnementaux ayant une influence sur la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) ont pu être identifiés. Il s'agit de la surface du plan d'eau, de son régime hydrologique et de la pluviométrie annuelle moyenne, et dans une moindre mesure de la hauteur du toit sur lequel est situé la mare, de la densité de recouvrement par la végétation, et du pH de l'eau.

En se basant sur ces résultats, plusieurs mesures ont été proposées afin d'optimiser le potentiel de promotion de la biodiversité des mares sur toits. Il s'agit en premier lieu d'augmenter le nombre de mare faisant plus de 5 [m²], et d'en avoir une plus grande proportion qui soient en eau de façon permanente. Cette deuxième mesure permettrait également de limiter la présence d'insectes piqueurs et le disservice qu'ils représentent. L'intérêt de diversifier les caractéristiques de ces mares et de multiplier leur nombre, y compris sur la même toiture, a été souligné.

7.2. Perspectives

Ce travail est une première évaluation de la biodiversité des mares sur toits, et les résultats obtenus sont basés sur des données relevées durant un passage en juin 2021 dans les grandes villes du Plateau Suisse. De plus, les mares étudiées étant majoritairement des petits milieux temporaires à caractère pionnier, il est probable que les espèces qu'elles hébergent varient relativement rapidement selon la saison, ou d'une année à l'autre selon la météo. Il serait donc judicieux d'avoir l'appui d'études supplémentaires reprenant la même méthode, pour confirmer et compléter les résultats obtenus, soit :

- Sur les mêmes mares à d'autres période de l'année, ou à la même période plusieurs années de suite.
- Sur d'autres mares sur toits en Suisse, par exemple hors des villes ou en altitude (si elles existent), ou nouvellement aménagées après la réalisation de ce travail.
- Sur des mares sur toits d'autres pays, se trouvant à l'intérieur ou en dehors des villes, et à des altitudes différentes.

Des relevés sur d'autres mares possédant une végétation aquatique permettront d'avoir suffisamment de données pour mettre en évidence les paramètres de l'environnement ayant une influence sur sa présence et sa richesse, comme cela a pu être fait ici pour les macroinvertébrés aquatiques. Ce commentaire concerne aussi d'autres groupes non étudiés dans le cadre de ce travail, qui pourraient bénéficier de la présence des mares sur toits, comme le zooplancton, le phytoplancton, le périphyton et la végétation non vasculaire (algues filamenteuses, mousses, lichens), mais également les oiseaux aquatiques et toutes espèces pouvant venir s'y abreuver ou s'y alimenter.

De la même façon, étudier plus de mares sur toits possédant un substrat, ou relever d'autres paramètres telle la durée d'exposition au soleil, la température moyenne et maximale, l'oxygénation de l'eau, ou encore l'âge des mares, permettra d'avoir une vision plus complète des facteurs liés à la richesse en espèces de ces mares. Sur cette base, les résultats et recommandations de ce travail pourront être complétés, afin d'optimiser au mieux le potentiel de ces mares pour promouvoir la biodiversité.

Par ailleurs, il serait intéressant de comparer les espèces des mares sur toits à celles des mares au sol, urbaines et rural, pour vérifier si elles n'ont pas tendance à en favoriser des différentes, ce qui les rendraient complémentaires entre elles.

Un dernier aspect essentiel n'ayant pu être abordé dans le cadre de ce travail est de vérifier que ces mares ne représentent pas des puits écologiques pour certaines espèces, en raison par exemple de leur caractère temporaire ou de la qualité de leur eau (paramètres physico-chimiques).

8. Sources

8.1. Références bibliographiques

- Baumann, N. (2014). Corridors biologiques : des pas japonais sur les toits des bâtiments. *La Revue Durable*, 52, 46-48.
- Beninde, J., Veith, M., & Hochkirch, A. (2015). Biodiversity in cities needs space : a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. *Ecology Letters*, 18, 581–592. doi:10.1111/ele.12427
- Bornand, C., Gygax, A., Juillerat, P., Jutzi, M., Möhl, A., Rometsch, S., ... H., Eggenberg, S. (2016). *Liste rouge Plantes vasculaires. Espèces menacées en Suisse*. Berne, Suisse : Office fédéral de l'environnement (OFEV)/Genève, Suisse : Info Flora.
- Buholzer, S., Nobis, M., Schoenenberger, N., & Rometsch, S. (2014). *Liste des espèces exotiques envahissantes*. Genève, Suisse : Info Flora.
- Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). (2015). *Milieus humides et aménagement urbain : Dix expériences innovantes*. Bron, France : Auteur.
- Chester, E. T., & Robson, B. J. (2013). Anthropogenic refuges for fresh-water biodiversity : Their ecological characteristics and management. *Biological Conservation*, 166, 64–75. doi:10.1016/j.biocon.2013.06.016
- Clergeau, P., & Machon, N. (2014). *Où se cache la biodiversité en ville ? 90 clés pour comprendre la nature en ville*. Versailles, France : Quae.
- Conseil fédéral. (2012). *Stratégie Biodiversité Suisse*.
- Dover, J. (2015). *Green infrastructure : incorporating plants and enhancing biodiversity in buildings and urban environments*. Londres, Royaume-Uni : Routledge. Repéré à : doi:10.4324/9780203121993
- Dudgeon, D., Athington, A. H., Gessner, M. O., Kawabata, Z., Knowler, D. J., Levequ, C., ... Sullivan, C. A. (2006). Freshwater biodiversity : Importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*, 81, 163–182.
- Duelli, P. (1994). *Liste rouge des espèces animales menacées de Suisse*. Berne, Suisse : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).
- El Jai, B., & Pruneau, D. (2015). Favoriser la restauration de la biodiversité en milieu urbain : les facteurs de réussite dans le cadre de quatre projets de restauration. *VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement*, 15(3). doi:10.4000/vertigo.16807
- European Pond Conservation Network (EPCN). (2008). *The Pond Manifesto*.
- Filazzola, A., Shrestha, N., & Scott MacIvor, J. (2019). The contribution of constructed green infrastructure to urban biodiversity : A synthesis and meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 56(9), 2131–2143. doi:10.1111/1365-2664.13475
- Frossard, P.-A., & Oertli, B. (2015). *Manuel de gestion : Recommandation pour la gestion des mares urbaines pour favoriser la biodiversité*. Genève, Suisse : Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture (HEPIA).
- Gonseth, Y., & Monnerat, C. (2002). *Liste rouge des Libellules menacées en Suisse*. Berne, Suisse : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)/Neuchâtel, Suisse : Centre Suisse de Cartographie de la Faune (CSCF).

- Hale, R., Coleman, R., Pettigrove, V., & Swearer, S. E. (2015). Review : identifying, preventing and mitigating ecological traps to improve the management of urban aquatic ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 52(4), 928-939. doi:10.1111/1365-2664.12458
- Hassall, C. (2014). The ecology and biodiversity of urban ponds. *WIREs Water*, 1(2), 187–206. doi:10.1002/wat2.1014
- Hill, M. J., Biggs, J., Thornhill, I., Briers, R. A., Gledhill, D. G., White, J. C., Wood, P. J., & Hassall, C. (2016). Urban ponds as an aquatic biodiversity resource in modified landscapes. *Global Change Biology*, 23, 986-999. doi:10.1111/gcb.13401
- Hill, M. J., Hassall, C., Oertli, B., Fahrig, L., Robson, B. J., Biggs, J., ... Wood, P. J. (2018). New policy directions for global pond conservation. *Conservation Letters*, 11(5), e12447. doi:10.1111/conl.12447
- Hill, M. J., Ryves, D. B., White, J. C., & Wood, P. J. (2016). Macroinvertebrate diversity in urban and rural ponds: Implications for freshwater biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 201, 50-59. doi:10.1016/j.biocon.2016.06.027
- Horch, P., Baumann, N., Abt, I., Wirz, R. & Brenneisen, S. (2015). *Erfolgreiche Kiebitzbruten auf extensiv begrünten Flachdächern. Das Beispiel der Flachdächer der Firma ALSO Schweiz AG, Emmen, mit weiterführenden Massnahmen und Tipps für die Umsetzung*. Sempach, Suisse : Institut suisse d'ornithologie (Vogelwarte)/Wädenswil, Suisse : Haute école spécialisée de Zurich (ZHAW).
- Indermuehle, N., Angélibert, S. & Oertli, B. (2008). *IBEM : Indice de Biodiversité des Étangs et Mares. Manuel d'utilisation*. Genève, Suisse : Ecole d'Ingénieurs HES de Lullier.
- Lubini, V., Knispel, S., Sartori, M., Vicentini, H., & Wagner, A. (2012). *Listes rouges Ephémères, Plécoptères, Trichoptères. Espèces menacées en Suisse, état 2010*. Berne, Suisse : Office fédéral de l'environnement (OFEV)/Neuchâtel, Suisse : Centre Suisse de Cartographie de la Faune (CSCF).
- Mak, C., Scholz, M., & James, P. (2017). Sustainable drainage system site assessment method using urban ecosystem services. *Urban Ecosystems*, 20, 293-307. doi:10.1007/s11252-016-0593-6
- Nagase, A., & Nomura, M. (2014). An evaluation of one example of biotope roof in Japan: Plant development and invertebrate colonisation after 8 years, *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 714-724. doi:10.1016/j.ufug.2014.07.004
- Oertli, B. (2018). Freshwater biodiversity conservation : the role of artificial ponds in the 21st century. *Aquatic Conservation : Marine and Freshwater Ecosystems*, 28, 264-269. doi:10.1002/aqc.2902
- Oertli, B., Auderset Joye, D., Castella, E., Juge, R., & Lachavanne, J.-B. (2000). *Diversité biologique et typologie écologique des étangs et petits lacs de Suisse*. Berne, Suisse : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)/Genève, Suisse : Laboratoire d'écologie et de biologie aquatique (LEBA) de l'Université de Genève.
- Oertli, B., & Frossard, P.-A. (2013). *Mares et étangs : écologie, gestion, aménagement et valorisation*. Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Oertli, B., & Ilg, C. (2014). *MARVILLE. Mares et étangs urbains: hot-spots de biodiversité au cœur de la ville ?* Genève, Suisse : Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture (HEPIA).
- Oertli, B., & Parris, K. M. (2019). Review : Toward management of urban ponds for freshwater biodiversity. *Ecosphere*, 10(7), e02810. doi:10.1002/ecs2.2810

- Office fédéral de l'environnement (OFEV). (2014). *La biodiversité en Suisse : Résumé du cinquième rapport national remis au Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique*. Berne, Suisse : Auteur.
- Office fédéral de l'environnement (OFEV). (2019). *Liste des espèces et des milieux prioritaires au niveau national*. Berne, Suisse : Auteur.
- Parris, K. M. (2016). *Ecology of urban environments*. Hoboken, New Jersey, USA : Wiley Blackwell.
- Service des parcs et domaines de la Ville de Lausanne (SPADOM). (2014). *Toitures végétalisées, guide de recommandations : pourquoi et comment accueillir la nature sur son toit ?* (2ème éd.). Lausanne, Suisse : Auteur.
- Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2015). Roof ponds as passive heating and cooling systems : A systematic review. *Applied Energy*, 160, 336-357. doi:org/10.1016/j.apenergy.2015.09.061
- Sievers, M. K., Hale, R., Swearer, S. E., & Parris, K. M. (2018). Frog occupancy of polluted wetlands in urban landscapes. *Conservation Biology*, 33(2), 389-402. doi:10.1111/cobi.13210
- Song, U., Kim, E. J., Bang, J. H., Son, D. J., Waldman, B., & Lee, E. J. (2013). Wetlands are an effective green roof system. *Building and Environment*, 66, 141-147. doi:10.1016/j.buildenv.2013.04.024
- Sutton, R. K. (Éd). (2015). *Green Roof Ecosystems*. USA, Lincoln : Auteur/Cham, Suisse : Springer International Publishing Switzerland. doi:10.1007/978-3-319-14983-7
- Tachet, H., Richoux, P., Bournaud, M., & Usseglio-Polatera, P. (2002). *Invertébrés d'eau douce : systématique, biologie, écologie*. Paris, France : CNRS éditions.
- Teixeira, C.P., & Fernandes, C.O. (2020). Novel ecosystems : a review of the concept in non-urban and urban contexts. *Landscape Ecology*, 35, 23–39. doi:10.1007/s10980-019-00934-4
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2018). *World Urbanization Prospects : The 2018 Revision*.
- Vo, T.-D.-H., Bui, X.-T., Lin, C., Nguyen, V.-T., Hoang, T.-K.-D., Nguyen, ... Guo, W. (2019). A mini-review on shallow-bed constructed wetlands : a promising innovative green roof. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 38-47. doi:org/10.1016/j.coesh.2019.09.004
- Zamora-Marín, J. M., Ilg, C., Demierre, E., Bonnet, N., Wezel, A., Robin, J., ... Oertli, B. (2021). Contribution of artificial waterbodies to biodiversity : A glass half empty or half full ? *Science of The Total Environment*, 753, 141987. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141987
- Zehnsdorf, A., Willebrand, K.C.U., Trabitzzsch, R., Knechtel, S., Blumberg, M., & Müller, R.A. (2019). Wetland roofs as an attractive option for decentralized water management and air conditioning enhancement in growing cities – a review. *Water*, 11(9), 1845. doi:10.3390/w11091845

8.2. Autres sources d'informations

Directives municipales du 16 août 2018 concernant l'attribution de subventions pour la réalisation de toitures végétalisées extensives sur les bâtiments privés sur le territoire de la Commune de Lausanne (850.1).

Espace pour la vie. (2021). Les insectes aquatiques. Repéré à <https://espacepurlavie.ca/les-insectes-aquatiques>

Info Flora. (2021). Centre national de données et d'informations sur la flore de Suisse. Repéré à <https://www.infoflora.ch/fr/>

Livingroofs.org. (2021). Is blue the new green ? Or are we just blending our colours for the sake of it. Repéré à <https://livingroofs.org/blue-infrastructure-new-green/>

Loi cantonale de Bâle-Ville du 17 novembre 1999 sur la construction et l'urbanisme, état le 29 décembre 2019 (= BPG ; 730.100).

Ordonnance fédérale du 18 mai 2005 sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux, état le 1^{er} mars 2021 (= Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques, ORRChim ; RS 814.81).

Ordonnance fédérale du 16 janvier 1991 sur la protection de la nature et du paysage, état le 1^{er} juin 2017 (= OPN ; RS 451.1).

Norme SIA 312 (2013). *Végétalisation de toitures*. Zurich, Suisse : SIA éditions.

Norme SIA 270 (2007). *L'étanchéité des bâtiments*. Zurich, Suisse : SIA éditions.

Tribune de Genève. (2021). Neuf étangs sur dix ont disparus en deux siècles. Repéré à <https://www.tdg.ch/suisse/neuf-etangs-dix-disparu-deux-siecles/story/26059417>

ANNEXES

Travail de Bachelor présenté par :

Rafael DONATH

pour l'obtention du titre Bachelor of Science HES-SO en Gestion de la Nature

Liste des annexes

Annexe 1 : Tableau récapitulatif général des informations récoltées sur les 37 mares inventoriées en juin 2021.....	54
Annexe 2 : Matériel utilisé pour l'inventaire des 37 mares sur toits en juin 2021.....	56
Annexe 3 : Matrice de corrélation des paramètres retenus pour la modélisation liant la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) et les paramètres de l'environnement des 37 mares en juin 2021 (extrait de Minitab).....	57
Annexe 4 : Liste des taxons floristiques relevées dans les mares sur toits inventoriées, classés par types de végétation, avec leur coefficient d'abondance-dominance (Braun-Blanquet) par mare, leur fréquence de présence dans les 37 mares, et la richesse spécifique en espèces végétales aquatiques par mare, en juin 2021.....	58
Annexe 5 : Liste des taxons faunistiques relevées dans les mares sur toits inventoriées, classés par familles et groupes taxonomiques, avec leur abondance dans les relevés, leur fréquence de présence dans les 37 mares, et la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) par mare, en juin 2021.....	59

Annexe 1 : Tableau récapitulatif général des informations récoltées sur les 37 mares inventoriées en juin 2021

Les quatre valeurs surlignées dans la catégorie Physico-chimie ont été estimées en se basant sur celles d’autres mares de niveau trophique similaire, afin de ne pas perdre de mares ou influencer les résultats lors de l’analyse des données. Par ailleurs, la hauteur par rapport au sol de certaines toitures dépend du côté considéré. Dans le cas de LullC, LullN, LullS et BostE, l’un des côtés est au niveau du sol, et le toit en est séparé par un muret. Une hauteur de 0,5 mètre a donc été choisie de façon à traduire l’accessibilité de ces toitures pour des espèces se déplaçant au sol.

Code mare	Mare	Ville	Canton	Infos générales										Physico-chimie								Infos relevé										
				Surface [m2]	Log10(surface)	Profondeur moy [cm]	Profondeur max [cm]	Basin versant [m2]	Pluviométrie (moyenne annuelle 1980-2020) [mm/an]	Alimentation en eau	Régime hydrologique (1=arénement en eau - 5=permanent)	Hauteur toiture [m]	Gestion	Etanchéité	Pente berges	Epaisseur substrat [cm]	pH moy	Conductivité moy [µS/cm2]	Transparence min [cm]	Turbidité max [FTU]	Cyanobactérie max [µg/L]	Chlorophylle a max [µg/L]	Pot [mg/L]	Niveau trophique selon max Prot ou Chla (1=oligoT, 2=mésoT, 3=eut, 4=hyperT, 5=hautelement hypertrophe)	Date relevé	Heure relevé	Météo (1beau-3nuage-5pluie)	Météo antérieure	En eau	Remarques		
BITGE	BIT	Genève	Genève	3550,0	3,6	21	30	1000	915	Oui		5	3,5	Ramassage des feuilles mortes 2x/an. Remplissage à l'eau du lac lorsque le niveau est bas.	Revêtement bitumineux	angle droit	0	8,2	223	60	14,6	0,8	8,0	0,018		2	22.06.2021	09h00-12h00	2	pluie la veille	Oui	
Corbu	Ecole Corbusier	Genève	Genève	6,0	0,8	9	10	0	915			1	13,5		Bache noire	douce	3	9,0	102	18	18,4	13,2	103,9	0,099		4	14.06.2021	09h00-10h00	1	peu de pluie	Non	
DIPOX	DIP Onex	Genève	Genève	5,0	0,7	12	13	0	915			2	18,3	Pas de phyto, pas d'entretien. Travaux d'étanchéité récents.	Bache noire	douce	2	7,8	154	60	23,0	1,1	7,6	0,018		2	14.06.2021	15h00-15h30	1	peu de pluie	Non	
Fenic	Châtelaine	Genève	Genève	7,0	0,8	15	18	0	915			3	5,0	Aucun phyto, aucune eau ajoutée, "aucun entretien nécessaire".	Bache noire	douce	1	8,1	142	60	10,7	1,2	6,7	0,021		2	14.06.2021	11h30-13h00	1	peu de pluie	Oui	
Hive	The Hive	Genève	Genève	4,0	0,6	15	20	0	915			2	5,0		Bache noire	douce	2	7,7	196	60	15,0	0,0	8,0	0,031		2	21.06.2021	15h00-16h00	1	pluie la veille	Oui	
LullC	Lullier Centre	Genève	Genève	1,0	0,0	22	30	0	915			4	0,5		Bac noir	angle droit	0	9,1	313	4,5	15,0	2,7	132,7			4	03.06.2021	09h30-10h00	2	peu de pluie	Oui	Couleur brune
LullN	Lullier Nord	Genève	Genève	1,0	0,0	22	30	0	915			4	0,5		Bac noir	angle droit	0	10,7	303	2	60,3	182,6	556,6			4	03.06.2021	09h00-09h30	2	peu de pluie	Oui	Couleur verte
LullS	Lullier Sud	Genève	Genève	1,0	0,0	22	30	0	915			4	0,5		Bac noir	angle droit	0	10,7	308	3	34,8	188,6	519,8			4	03.06.2021	10h00-10h30	2	peu de pluie	Oui	Couleur verte
Sonnx	Le Pommier	Genève	Genève	750,0	2,9	30	45	0	915	Oui		5	3,0		Béton	angle droit	0	8,6	199	60	12,0	0,8	3,4	0,015		2	21.06.2021	10h00-11h30	2	pluie la veille	Oui	
BleuE	Beaulieu est	Lausanne	Vaud	2,5	0,4	4	10	0	1174			2	14,0		Bache noire	douce	2	8,4	178	7	27,8	16,7	259,6	0,267		5	25.06.2021	10h30-11h00	2	pluie chaque soir depuis 1 semaine	Oui	
BleuW	Beaulieu ouest	Lausanne	Vaud	2,5	0,4	5	8	0	1174			2	14,0	Arrachage sporadique des plantes faisant de l'ombre aux panneaux solaires. Pas d'arrosage.	Bache noire	douce	2	9,5	45	42	14,3	6,1	30,0			3	25.06.2021	11h00-11h30	2	pluie chaque soir depuis 1 semaine	Oui	
BostE	Boston	Lausanne	Vaud	3,0	0,5	8	9	0	1174			2	0,5	Pas de phyto. Pas de remplissage. La seule intervention: arrachage d'arbres et arbustes.	Bache noire	marquée	2	10,8	284	10	130,6	129,1	866,8	0,169		4	23.06.2021	14h30-15h30	2	pluie la veille	Oui	Couleur brune
Figue	Figuiers	Lausanne	Vaud	2,5	0,4	10	9	0	1174			2	13,5		Bache noire	douce	3,5	10,0	282	4	117,1	0,0	270,4	0,322		5	23.06.2021	13h00-14h00	2	pluie la veille	Oui	
Pisci	Piscine Montetan	Lausanne	Vaud	2,5	0,4	6	12	0	1174			2	6,0		Bache noire	douce	1	9,9	178	14	12,1	6,9	148,6			4	08.06.2021	13h00-14h00	4	pluie 4j avant	Oui	
VineC	Vinet milieu	Lausanne	Vaud	2,0	0,3	5	8	0	1174			2	28,0		Bache noire	douce	0	9,5	119	60	16,9	4,4	17,4		2,5	25.06.2021	09h30-10h00	2	pluie chaque soir depuis 1 semaine	Oui	Une extrémité plus basse, impossible de remplir à plus de 50% du volume	
VineN	Vinet nord	Lausanne	Vaud	4,0	0,6	12	20	0	1174			3	28,0		Bache noire	douce	0	9,2	174	2,5	25,0	100,0	463,6	0,101		4	25.06.2021	10h00-10h30	2	pluie chaque soir depuis 1 semaine	Oui	Couleur verte
VineS	Vinet sud	Lausanne	Vaud	6,0	0,8	4,5	8	0	1174			1	28,0	Aucun phyto, entretien manuel.	Bache noire	douce	1	9,8	39	13	17,9	20,0	219,4		4	25.06.2021	09h00-09h30	2	pluie chaque soir depuis 1 semaine	Oui	Une extrémité plus basse, impossible de remplir à plus de 50% du volume	
Vevey	Maria-Belgia	Vevey	Vaud	25,0	1,4	21	25	0	1229			3	21,5		Multicouches synthétiques	douce	5	8,3	181	49	7,0	0,8	9,2	0,022	2,5	23.06.2021	10h00-11h00	2	pluie la veille	Oui		
YverE	STEP est	Yverdon	Vaud	2,5	0,4	11	10	0	761			1	9,5	1 fauche/an en mars, 2 xContrôle /an adventices(Erigeron canadensis), 40cm de substrat Ricoter toitures, Semis mélange UFA toiture plate, Bache étang "standard".	Bache noire	douce	4	7,7	210	57	6,6	1,8	22,9	0,381		5	08.06.2021	10h30-11h00	2	pluie 4j avant	Non	
YverW	STEP ouest	Yverdon	Vaud	2,5	0,4	10	12	0	761			1	9,5		Bache noire	douce	4	8,1	203	48	7,0	1,7	21,2	0,072	2,5	08.06.2021	11h00-11h30	2	pluie 4j avant	Non		
AlsoB	Also bas	Lucerne	Lucerne	5,0	0,7	5	10	0	1205	Oui		4	14,0		Bache noire	douce	0	9,2	241	32	9,1	8,5	28,4	0,11		4	10.06.2021	15h00-15h30	1	pluie 6j avant	Oui	
AlsoH	Also haut	Lucerne	Lucerne	3,5	0,5	7	9	0	1205	Oui		4	19,5	Mare remplie régulièrement. Pas de nettoyage effectué.	Bache noire	douce	0	9,1	239	17	7,7	3,9	31,9	0,12		4	10.06.2021	14h30-15h00	1	pluie 6j avant	Oui	
ConcG	Contec grand	Thoune	Bern	120,0	2,1	40	40	0	971	Oui		5	6,0		Béton	angle droit	3,5	7,6	201	58	4,9	0,9	17,1	0,016		4	10.06.2021	9h30-11h00	1	pluie 6j avant	Oui	
ConcP	Contec petit	Thoune	Bern	4,0	0,6	8	15	0	971	Oui		4	6,0	Arrosage de la toiture.	Bache	douce	2	7,2	259	10	16,6	29,4	310,2	0,191		4	10.06.2021	11h00-11h30	1	pluie 6j avant	Oui	
GemB	Gamperle bas	Zoug	Argovie	12,0	1,1	8,5	18,5	126	1205			3	6,0		Bache	angle droit	3	8,4	210	54	5,9	0,8	21,9	0,017		2	10.06.2021	16h30-17h00	1	pluie 6j avant	Oui	
GemH	Gemperle haut	Zoug	Argovie	20,0	1,3	10	25	90	1205			3	6,0		Bache	angle droit	3	9,1	172	12	5,5	0,7	123,8	0,01		4	10.06.2021	16h00-16h30	1	pluie 6j avant	Oui	
Gossa1	Gossau A	Saint-Gall	Saint-Gall	2,0	0,3	6	12	0	1265	Oui		3	12,0		Bache noire	douce	0	7,8	165	30	11,6	24,3	51,8	0,057		3	11.06.2021	09h30-10h00	1	pluie 7j avant	Oui	
Gossa2	Gossau A	Saint-Gall	Saint-Gall	3,0	0,5	7	15	0	1265	Oui		3	12,0		Bache noire	douce	0	8,4	151	8	19,6	68,8	490,6	0,119		4	11.06.2021	10h00-10h30	1	pluie 7j avant	Oui	Mousse quand touillée
Gossa3	Gossau A	Saint-Gall	Saint-Gall	3,0	0,5	7	15	0	1265	Oui		3	12,0		Bache noire	douce	0	8,7	119	11	7,4	10,5	39,9	0,052		3	11.06.2021	10h30-11h00	1	pluie 7j avant	Oui	
Gossa4	Gossau A	Saint-Gall	Saint-Gall	3,0	0,5	7	10	0	1265	Oui		3	12,0		Bache noire	douce	0	8,2	65	32	6,7	7,5	100,8	0,061		4	11.06.2021	11h00-11h30	1	pluie 7j avant	Oui	
Gossa5	Gossau A	Saint-Gall	Saint-Gall	4,0	0,6	10	16	0	1265	Oui		3	12,0		Bache noire	douce	0	7,9	75	19	8,2	10,2	32,3	0,032		3	11.06.2021	11h30-12h00	1	pluie 7j avant	Oui	
Gossa6	Gossau A	Saint-Gall	Saint-Gall	5,0	0,7	8	10	0	1265	Oui		3	12,0		Bache noire	douce	0	7,9	36	15	11,2	10,2	58,0	0,045		3	11.06.2021	12h00-12h30	1	pluie 7j avant	Oui	
Gossa7	Gossau A	Saint-Gall	Saint-Gall	5,0	0,7	14	20	0	1265	Oui		3	12,0		Bache noire	douce	0	8,5	81	32	6,1	2,5	34,8	0,025		3	11.06.2021	12h30-13h00	1	pluie 7j avant	Oui	
Gossa8	Gossau A	Saint-Gall	Saint-Gall	4,0	0,6	5	10	0	1265	Oui		2	16,0		Bache noire	douce	0	8,6	93	41	7,2	2,3	43,7	0,034		3	11.06.2021	13h00-13h30	1	pluie 7j avant	Oui	
Gossa9	Gossau A	Saint-Gall	Saint-Gall	2,0	0,3	5	10	0	1265	Oui		2	16,0		Bache noire	douce	0	9,6	51	6	14,0	14,4	277,8			4	11.06.2021	14h00-14h30	1	pluie 7j avant	Oui	
Gossa10	Gossau A	Saint-Gall	Saint-Gall	2,0	0,3	5	10	0	1265	Oui		2	16,0		Bache noire	douce	0	8,4	94	20	12,9	23,7	61,0			3	11.06.2021	14h30-15h00	1	pluie 7j avant	Oui	
Gossa11	Gossau C	Saint-Gall	Saint-Gall	3,0	0,5	6	9	0	1265	Oui		2	13,0	Roseaux arrachés systématiquement. Remplissage sporadique en été.	Bache noire	douce	0	9,0	158	24	10,2	1,3	68,1	0,027		3	11.06.2021	15h00-15h30	1	pluie 7j avant	Oui	

Annexe 1 : Tableau récapitulatif général des informations récoltées sur les 37 mares inventoriées en juin 2021 (suite)

Code mare	Micro-habitats																								Faune						Vég mares						Vég bords				Autres infos toitures											
	Diversité micro-habitats (indice div Shannon)	Richesse de micro-habitats	Béton (% surface)	Revêt bitumineux (% surface)	Multicouches synthétiques (% surface)	Bac plastique (% surface)	Bache plastique (% surface)	Terre (% surface)	Sable (% surface)	Pouzolane (% surface)	Argile expansé (% surface)	Tessons d'argile (% surface)	Gravier <2cm (% surface)	Cailloux 3-5cm (% surface)	Cailloux 5-10cm (% surface)	Cailloux >10cm (% surface)	Natte coco (% surface)	Bois (% surface)	Briques (% surface)	Vég mare (% surface)	Vég bord (% surface)	CPOM (% surface)	FPOM (% surface)	POM flottant (% surface)	Détail CPOM	Zooplankton	Macro-invertébrés	Richesse familiale macro-invertébrés aquatiques	Moustiques	Moustique tigre	Ceratopogonidae	Libellules au vol	Amphibiens	Poissons	Richesse spécifique végétation aquatique	Recouvr vég mare (% surface)	Hydroph f libres (%S)	Hydroph f submerg (%S)	Hydroph f flottantes (%S)	Hélophytes (%S)	Vég terrestre (%S)	Substrat nu mare (%S)	Recouvr vég bord (% surface)	Vég <20cm (%S)	Vég >20cm (%S)	Substrat nu bord (%S)	Substrat bord	Structures bord	Fleurs (coef abondance-dominance Braun-Blanquet)	Hyménoptères volants	Oiseaux	Remarques2
BITGE	1,35	6	60											40						25	0,1	1	70	Feuilles mortes Léger dépôt organique sur moitié surface inférieure mare				Oui	Oui	10			Oui			6	25			15	10	75	0,1	0	0,1	100						
Corbu	1,06	5				5								95	10		5			80								Non		0						0	0				100	80	0	80	20	Gravier, tessons d'argile, MO	Non	3	100		Tas de bois et hôtel à insectes sur toit	
DIPOX	0,66	2												100						60				Aucun dépôt				Non		0						0	0				60	10	50	40	Pouzolane	Tas bois, rochers 20%	4	20	10	Moineaux, hirondelles de fenêtre, corneilles		
Fenic	1,75	8				30							60		30		5			0,1	80	100	50	POC				Oui	Oui	4	Oui				0	0,1		0,1	100	80	40	40	20	Pouzolane	2 tas bois	3			Pigeons, corneille, moineaux			
Hive	0,60	2											100								40			Aucun dépôt				Non		0						0	0				100	40	10	30	60	Pouzolane	Tas buchettes	3	5	10	Étourneaux, corneilles	
LulIC	1,59	6				20									60			20				20	60	10	Feuilles mortes				Oui		4	Oui		Oui			0	0			100	0	0	0	100	Béton						
LulIN	1,59	6				20									60			20				80	20	20	Feuilles mortes				Oui		2					0	0			100	0	0	0	100	Béton							
LulIS	1,68	6				20									60			20				40	20	20	Feuilles mortes				Oui		4		Oui			0	0			100	0	0	0	100	Béton							
Sonnx	1,43	6	70				30												30		5	50	1	Feuilles mortes				Oui	Oui	6			Oui	Oui	5	30		10	20	70	0	0	0	100	béton, bois	Trop plein, chemins, passerelles, bancs, poubelle, barrières	10			Vég plantée dans pots/bacs		
BleuE	1,93	8				30			45	20				5						60	30	50	20	Débris vég, noix et os				Oui		2		Oui				0	0			100	60	30	30	40	Pouzolane, argile expansé	Grandes tuiles retournées, panneaux solaires	4	100	5	Moineaux, pigeons		
BleuW	1,89	8				30			40	15				15						80	20	20	20	Débris vég, noix et os				Oui		1		Oui				0	0			100	80	30	50	20	Pouzolane, argile expansé	Grandes tuiles retournées, panneaux solaires	4	100	5	Moineaux, pigeons		
BostE	1,66	8				85							5	5	100	5				40		100	30	Feuilles mortes et POC				Oui		1		Oui				0	0			100	40	30	10	60	Brique, béton, cailloux, terre	Gd tas bois et cailloux	3	50	5	Moineaux		
Figue	1,92	10				40					50	10	10	10			1		5	80	30	30		Mousse, POC, bois				Oui		1		Oui				0	5		5	95	80	30	50	20	Tessons d'argile	Tas de pierre, buches, grande tuile retournée	4	50	3	Pigeons		
Pisci	1,68	7				30			10					10	50					80	10	50		Mousse (et 60%S natte coco en décompo)				Oui		3		Oui				0	0			100	80	40	40	20	Pouzolane	Tas de bois, bouches d'aération, hublots, panneaux solaires	4					
VineC	1,83	8				50		20					30	10	1					60	40	20		POC				Non		0						0	0			100	60	60	0	40	Pouzolane, cailloux, brique, MO	Grands cailloux autour mare, tas de bois à proxi	3	10	10	Syrphes, couple tourterelles turques, goélands, moineaux, martinets		
VineN	1,35	6				100								1		20				100	20	20		Débris vég				Oui		5		Oui				0	0			100	100	10	90	0	Pouzolane, cailloux, brique, MO	Bois mare reliés au bord, cercle continu grands cailloux autour, quelques autres grands cailloux à proxi	3	10	10	Syrphes, couple tourterelles turques, goélands, moineaux, martinets		
VineS	1,66	8				60							5	5	1	30	10			60			40					Non		0						0	0			100	60	60	0	40	Pouzolane, cailloux, brique, MO	Grands cailloux autour mare, tas de bois à proxi	3	10	10	Syrphes, couple tourterelles turques, goélands, moineaux, martinets		
Vevey	1,76	8			20							80		5	10			15	100	70	70		POC, os				Oui	Oui	2						0	15			15	85	100	100	0	0	Gravier, brique, MO	Bois, bouche d'aération, antenne, panneaux solaires	2	20	20	hirondelles de fenêtre		
YverE	1,45	6				5	20		75								30			10	80			Aucun dépôt				Non		0						0	10			10	90	80	20	60	20	terre		5	50			
YverW	1,54	7				5	20		75					20		10				10	80			Aucun dépôt				Non		0						0	10			10	90	80	20	60	20	terre	Vers de terre et limaces sous la pierre centrale	5	50			
AlsoB	1,61	6				80	20											20	80	50	20		POC, feuilles mortes				Oui	Oui	2							0	20			20	80	80	40	40	20	Pouzolane	Bac avec arbuste jouxtant, tuyeau d'alimentation en eau de la mare, reste toit = prairie humide pouvant s'assécher	3		2	Couple vanneaux huppés	
AlsoH	1,38	4				100													70	80		80	POC				Oui	Oui	1							0	0			100	70	20	50	30	Pouzolane	Tuyeau d'alimentation en eau de la mare	3		2	Couple vanneaux huppés		
ConcG	1,53	6	1				100											80	80	20	100		Algues filamenteuses				Oui	Oui	4			Oui	Oui	11	80		70	40	40	10	20	80	0	80	20	Tessons d'argile, gravier	Etang en U avec petit bâtiment au milieu, et terrasse au-dessus eau, chemin longeant, beaucoup de buissons et d'arbustes horticoles autour, essentiellement vég horticole	5		5		
ConcP	1,52	5					100											50	60	30	100		Algues filamenteuses				Oui	Oui	2							2	50			40	50	50	60	20	40	40	Tessons d'argile, gravier	Chemin longeant, petite table proche, majoritairement vég horticole	5		5	
GemB	1,75	6					50							25	25					50	50	50		POC				Oui	Oui	5			Oui			5	50			25	25	50	50	25	25	50	Cailloux, terre	Nombreux îlots et 1 pt bac dans mare, grille-passerelle traversant mare, tas cailloux	2			
GemH	1,75	6					50							25	25					50	50	50		POC				Oui	Oui	1			Oui			3	50			25	25	50	50	25	25	50	Cailloux, terre	Nombreux îlots et 1 pt bac dans mare, grille-passerelle traversant mare, tas cailloux	2			
Gossa1	1,84	8				5								20		20		40	90	40	60	20	POC, débris vég				Oui	Oui	3						0	40			40	60	90	0	90	10	Pouzolane	Vég tombant dans mare, rochers segementant mare, bois avec mousse relié au bord, tas rochers au bord, chemin passant à côté	3	1000	20	Carabes, bp fourmis, corneille, rougequeues, merles, moineaux, bergeronnettes, étourneaux, martinets		
Gossa2	1,92	8				10								25		25		40	90	30	60	50	POC, débris vég				Oui	Oui	2						2	40			35	5	60	90	20	70	10	Pouzolane	Ilot' central rochers syndant mare en deux, bois avec mousse relié au bord, vég dans et tombant dans mare, tas de bois et rochers au bord et à proxi, chemin passant à côté	3	1000	20	Carabes, bp fourmis, corneille, rougequeues, merles, moineaux, bergeronnettes, étourneaux, martinets	
Gossa3	1,83	8				10								10		10		20	70	20	50	30	POC, débris vég				Oui	Oui	2						0	20			20	80	70	30	40	30	Pouzolane	Mini ilot rochers central, bois suspendus, bois avec mousse relié au bord, vég tombant dans mare, tas de bois et rochers au bord et à proxi, chemin passant à côté	3	1000	20	Carabes, bp fourmis, corneille, rougequeues, merles, moineaux, bergeronnettes, étourneaux, martinets</		

Annexe 2 : Matériel utilisé pour l'inventaire des 37 mares sur toits en juin 2021

- Feuilles de papier et crayon
- Appareil photo
- Loupe
- Bottes voire cuissardes (pour les mares les plus grandes ou profondes)
- Filet à papillons
- Epuisette d'aquarium de maille $\leq 0,5$ [mm], avec une ouverture de 12 x 9 [cm], et ayant une poche de 10-12 [cm] de profondeur (privilégié au filet PLOCH de la méthode IBEM, car surtout petites mares peu profondes) (figure ci-dessous).
- Perche (sur laquelle accrocher l'épuisette pour les quelques mares les plus grandes ou profondes)
- Bac de tri (bac blanc pour bain de développement photographique)
- Bidon d'eau de 10-12 litres (prévoir au moins 1 litre par mare)
- Pissette d'alcool à 70% (prévoir au moins 50 [ml] par mare)
- Tubes en plastiques de 50 [ml] avec bouchons
- Etiquettes (bouts de papiers à mettre dans chaque tube)
- Pincettes
- Cuillère en plastique ou boîte de Petri (facilite le tri à la pince)



Figure : épuisettes utilisées pour la capture des macroinvertébrés aquatiques dans les 37 mares en juin 2021, avec à droite le modèle de référence (JBL, épuisette à maille fine, largeur 12 [cm]), au centre et à gauche deux épuisettes fabriquées dont une sur manche extensible

Annexe 3 : Matrice de corrélation des paramètres retenus pour la modélisation liant la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) et les paramètres de l'environnement des 37 mares en juin 2021 (extrait de Minitab)

	Log surface	Profondeur moyenne [cm]	Pluviométrie annuelle moyenne	Régime hydrologique	Hauteur du toit [m]
Profondeur moyenne [cm]	0,297				
Pluviométrie annuelle moyenne	-0,030	-0,549			
Régime hydrologique	0,260	0,494	0,007		
Hauteur du toit [m]	0,001	-0,593	0,435	-0,419	
pH moyen	-0,344	-0,222	0,030	-0,097	0,085
Cyanobactérie max [ug/L]	-0,494	-0,357	0,209	-0,009	0,093
Chlorophylle a max [ug/L]	-0,499	-0,258	0,205	-0,086	-0,041
Niveau trophique	-0,372	-0,199	0,006	-0,069	0,047
Diversité de micro-habitats	-0,212	-0,351	0,436	-0,068	0,085
Richesse en macroinvertébrés	0,191	0,271	0,285	0,620	-0,288
Recouvr vég mare	0,451	0,153	0,300	0,448	-0,231
Recouvr vég bord	-0,031	-0,274	0,508	-0,252	0,518
Richesse spécifique végétation	0,533	0,316	-0,123	0,512	-0,393
	pH moyen	Cyanobactérie max [ug/L]	Chlorophylle a max [ug/L]	Niveau trophique	Diversité de micro-habitats
Profondeur moyenne [cm]					
Pluviométrie annuelle moyenne					
Régime hydrologique					
Hauteur du toit [m]					
pH moyen					
Cyanobactérie max [ug/L]	0,289				
Chlorophylle a max [ug/L]	0,526	0,716			
Niveau trophique	0,362	0,443	0,731		
Diversité de micro-habitats	0,163	0,076	0,161	0,078	
Richesse en macroinvertébrés	-0,131	0,031	-0,022	-0,180	0,046
Recouvr vég mare	-0,469	-0,288	-0,235	-0,143	0,171
Recouvr vég bord	-0,224	0,094	-0,006	0,074	0,181
Richesse spécifique végétation	-0,275	-0,310	-0,182	-0,137	-0,079
	Richesse en macroinvertébrés	Recouvr vég mare	Recouvr vég bord		
Profondeur moyenne [cm]					
Pluviométrie annuelle moyenne					
Régime hydrologique					
Hauteur du toit [m]					
pH moyen					
Cyanobactérie max [ug/L]					
Chlorophylle a max [ug/L]					
Niveau trophique					
Diversité de micro-habitats					
Richesse en macroinvertébrés					
Recouvr vég mare	0,375				
Recouvr vég bord	0,117	0,166			
Richesse spécifique végétation	0,342	0,683	-0,275		

Annexe 4 : Liste des taxons floristiques relevées dans les mares sur toits inventoriées, classés par types de végétation, avec leur coefficient d'abondance-dominance (Braun-Blanquet) par mare, leur fréquence de présence dans les 37 mares, et la richesse spécifique en espèces végétales aquatiques par mare, en juin 2021

Taxon	AlsoB	AlsoH	BITGE	BleuE	BleuW	BostE	ConcG	ConcP	Corbu	DIPOX	Fenic	Figure	GembB	GembH	Gossa1	Gossa2	Gossa3	Gossa4	Gossa5	Gossa6	Gossa7	Gossa8	Gossa9	Gossa10	Gossa11	Hive	LulIC	LulIN	LulIS	Pisci	Sonnx	Vevey	VineC	VineN	VineS	YverE	YverW	Fréquence de présence
Hélophytes			6				3	2					5	3		2														4								19%
Alopecurus aequalis													+			3																						5%
Carex flava aggr.												2	2																									5%
Eleocharis palustris aggr.							2																															3%
Equisetum hyemale							+																															3%
Eriophorum latifolium												+																										3%
Iris pseudacorus			2																																			3%
Juncus articulatus			1					2				2	2																									11%
Juncus effusus			3																																			3%
Mimulus guttatus aggr.												+																										3%
Phragmites australis			2											1																		2						8%
Pontederia cordata			2																													1						5%
Sparganium erectum							2																															3%
Typha angustifolia																+																1						5%
Typha latifolia			+																													1						5%
Veronica beccabunga								3																									1					3%
Hydrophytes à feuilles flottantes							4																									1						5%
Menyanthes trifoliata							1																															3%
Nuphar lutea							1																															3%
Nymphaea sp.							2																									2						5%
Potamogeton natans							1																															3%
Hydrophytes à feuilles submergées							4																															3%
Ceratophyllum demersum							3																															3%
Characeae							1																															3%
Elodea nuttallii							2																															3%
Myriophyllum aquaticum							2																															3%
Richesse spécifique	0	0	6	0	0	0	11	2	0	0	0	0	5	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0
Végétaux terrestres	3		22				3	2			1	4	11	4	4	1	3	3	3	4	2	1	1		3						6				4	4	57%	
Acer pseudoplatanus			r																																			3%
Achillea millefolium																																				+		3%
Agrostis sp.			2																	r											1			+	1		14%	
Ajuga reptans																																			1	1		5%
Arrhenatherum elatius																																+					3%	
Asperula cynanchica																	1	+																			5%	
Betula pendula aggr.												r						1	+																		3%	
Bromus hordeaceus			r																													+						5%
Canna sp.							2																															3%
Carex flacca													3	3																							5%	
Carex hirta	2																																					3%
Carpinus betulus			r																																			3%
Cirsium vulgare			r																																			3%
Crepis sp.			r																																			3%
Cyperus eragrostis			1																																			3%
Dianella sp.			2																																			3%
Epilobium hirsutum			2										r	r	1																				+			14%
Epilobium parviflorum											r		r	r																		+				+		14%
Erigeron annuus			1																																			3%
Erigeron canadensis			+																																			3%
Euphorbia cyparissias											+																											3%
Festuca arundinacea			r																	+																		5%
Hieracium sp.											+																											3%
Holcus lanatus	2																			r												2					8%	
Indéterminé			1					3																														5%
Iris sp.							+																															3%
Linum catharticum													+																									3%
Lolium multiflorum			r																																			3%
Lotus corniculatus												+																										3%
Lythrum salicaria								2																														3%
Origanum vulgare															+																							3%
Panicum capillare			r																																			3%
Plantago lanceolata																																	1					3%
Polygonum mite							1																															3%
Prunella vulgaris													+	2																								5%
Rubus sp.			r																																			3%
Salix alba													r																									3%
Salix caprea	2		+										r																									8%
Salix myrsinifolia													+																									3%
Salix purpurea													r																									3%
Sanguisorba minor															3	1	2	1																				11%
Sedum sp.												1														+												27%
Silene dioica																																						

Annexe 5 : Liste des taxons faunistiques relevées dans les mares sur toits inventoriées, classés par familles et groupes taxonomiques, avec leur abondance dans les relevés, leur fréquence de présence dans les 37 mares, et la richesse en macroinvertébrés aquatiques (nombre de familles) par mare, en juin 2021

Taxon	Stade de développement	AlsoB	AlsoH	BITGE	BleuE	BleuW	BosteE	ConcG	ConcP	Corbu	DIPOX	Fenic	Figue	Gemb	GembH	Gossa1	Gossa2	Gossa3	Gossa4	Gossa5	Gossa6	Gossa7	Gossa8	Gossa9	Gossa10	Gossa11	Hive	LulIC	LulIN	LulIS	PiscI	Sonnx	Vevey	VineC	VineN	VineS	YverE	YverW	Total	Fréquence de présence					
Captures standardisées																																													
Coleoptera	adulte et larve	51	4	3					1			40		20	15					1		1	6		1	11			2	2	1		25		6						191	49%			
Dytiscidae	adulte et larve	51	4	1					1			40		20	15					1										2				25		6					166	30%			
Colymbetinae	larve			1										1					1										2												5	11%			
Hydroglyphus geminus	adulte	1	3									20			10																		20		3						57	16%			
Hydroporinae	adulte et larve	50	1						1			20		20	4																	5		3						104	22%				
Hydrophilidae	adulte et larve			2																	1	1	6		1	11				2	1										25	22%			
Helochares lividus	adulte																									1															1	3%			
Helophorus cf. grandis	adulte																									5															5	3%			
Helophorus cf. brevipalpis sp.	adulte																									5															5	3%			
Helophorus flavipes ou obscurus	adulte																									5															1	3%			
Helophorus sp.	adulte																				1	1	6		1						1										11	14%			
Diptera	larve et nymphe	1		26	3	1	30	100				1050	20			2		2	30	10	50	30	60	1	46	9		110	50	60	35	15	30		6						1777	68%			
Ceratopogonidae	larve				2	1	30						20					2	30	10	50	30		30	1	40		10	50	15				3							202	30%			
Chironomidae	larve et nymphe	1		25	1			100				1000				2		2	30	10	50	30	30		6	9		50	50	10	20	15	30		2						1473	57%			
Culicidae	larve											50																50														100	5%		
Stratiomyidae	larve																											50								1					1	3%			
Tipulidae	larve			1																																						1	3%		
Ephemeroptera	larve			54				2												1		1						2		50		1									111	19%			
Baetidae	larve			50				2												1		1						2		50											106	16%			
Cloeon dipterum	larve			50				2												1		1						2		50											106	16%			
Caenidae	larve			4																													1								5	5%			
Caenis cf. luctuosa	larve																																1								1	3%			
Caenis luctuosa	larve			4																																						4	3%		
Heteroptera	adulte et larve			32				2						1						3	1		5									2			10							56	22%		
Corixidae	adulte et larve			30				2														2													10							44	11%		
Gerridae	adulte et larve			2																2	1		2										1								8	14%			
Gerris sp.	adulte et larve			2																1		2										1									8	14%			
Notonectidae	larve												1							1		1										1									4	11%			
Odonata	larve			2				5						6		7	4	2	3	4	2	2	1								1											39	32%		
Aeshnidae	larve												2			6	1		2		2		1																			14	16%		
Aeshna cyanea	larve														1						2																					1	3%		
Coenagrionidae	larve							5						2																			1									8	8%		
Libellulidae	larve			2										2		1	3	2	1	4		2																				17	22%		
Libellula quadrimaculata	larve																					2																				2	3%		
Orthetrum cancellatum	larve			1																																							1	3%	
Orthetrum cf. brunneum	larve													2																												2	3%		
Sympetrum striolatum	larve			1																																							1	3%	
Sympetrum sp.	larve															1	3	2	1	4																						11	14%		
Oligochaeta	-			50				1000				100																															1150	8%	
Trichoptera	larve																																10									10	3%		
Hydroptilidae	larve																																10									10	3%		
Total par mare		52	4	167	3	1	30	109	1001	0	0	1190	20	27	15	9	4	4	37	16	53	39	67	1	47	20	0	112	52	112	36	29	55	0	22	0	0	0	0	3334					
Richesse (nombre de familles)		2	1	10	2	1	1	4	2	0	0	4	1	5	1	3	2	2	6	4	3	7	4	1	3	2	0	4	2	4	3	6	2	0	5	0	0	0	0						
Observations supplémentaires																																													
Gasteropoda	-			2																	2			5																		9	8%		
Clausiliidae terrestre	-																				1			5																	6	5%			
Indéterminée terrestre	-																				1																					1	3%		
Succineidae terrestre	-			2																																							2	3%	
Crustacea	-	1000	1000	1000				20	1000			1000		1000	70	1000	1000	1000	1000	50	1000	1000	1000		50	100						1000	1000										15290	54%	
Zooplanc-ton	-	1000	1000	1000				20	1000			1000		1000	70	1000	1000	1000	1000	50	1000	1000	1000		50	100						1000	1000											15290	54%
Collembola	-															1								2	1																		4	8%	
Diptera	adulte et larve											20													2	1				3														23	5%
Culicidae	adulte et larve											20																	3														23	5%	
Culex sp.	adulte et larve											20																	3														23	5%	
Heteroptera	adulte et larve															7																											8	5%	
Gerridae	adulte et larve															7																		1									8	5%	
Gerris sp.	adulte et larve															7																	1												