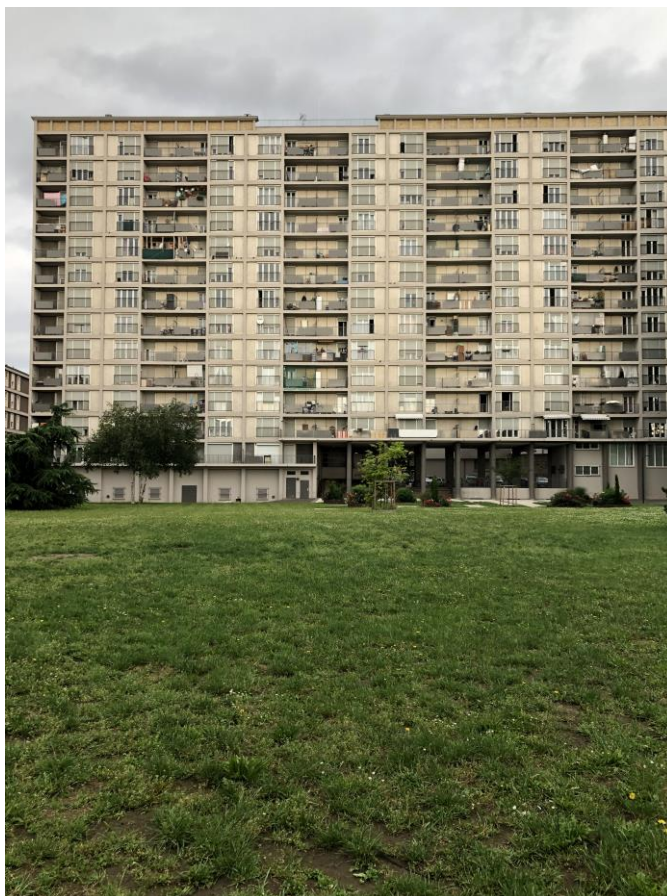


2020-2021

Master 2 Biodiversité, écologie et évolution  
Parcours Écologie et éco-ingénierie des zones  
humides

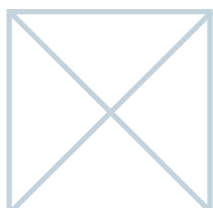


## Réponse fonctionnelle des espaces herbacés en milieu urbain

Photo : Espace herbacé de la ville de Strasbourg de type gazon, ©Benjamin Baudon

**Benjamin Baudon**

Sous la direction de Madame Audrey Muratet et de Monsieur Laurent  
Hardion



Soutenu publiquement le :  
08 septembre 2021

**L'auteur du présent document vous autorise à le partager, reproduire, distribuer et communiquer selon les conditions suivantes :**



- Vous devez le citer en l'attribuant de la manière indiquée par l'auteur (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'il approuve votre utilisation de l'œuvre).
- Vous n'avez pas le droit d'utiliser ce document à des fins commerciales.
- Vous n'avez pas le droit de le modifier, de le transformer ou de l'adapter.

**Consulter la licence creative commons complète en français :**  
**<http://creativecommons.org/licences/by-nc-nd/2.0/fr/>**

Ces conditions d'utilisation (attribution, pas d'utilisation commerciale, pas de modification) sont symbolisées par les icônes positionnées en pied de page.



# REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier l'ensemble des enseignants et intervenants du master EEZH, pour avoir réussi à maintenir des enseignements malgré les conditions sanitaires, sans qui je n'aurais jamais avoir les compétences nécessaires à la rédaction de ce rapport.

Je remercie également l'ensemble de ma promotion du master EEZH, pour leur solidarité et leur soutien moral.

Merci à monsieur Hervé Daniel pour avoir accepté d'être mon référent de stage et pour ses nombreux conseils.

Merci à l'ensemble du personnel du LIVE pour son accueil chaleureux et leur disponibilité à toute épreuve, ainsi qu'à tout le personnel du jardin botanique pour leurs disponibilité et leurs aides précieuses.

Merci à l'ensemble des membres de la ZAEU et notamment à Sandrine Glatron et Adine Hector.

Je remercie sincèrement Laurent et Audrey pour m'avoir fait confiance pour la réalisation de ce stage, cette expérience a été extrêmement enrichissante de tous les points de vue. Votre disponibilité de tout instant, votre patience face à mes très nombreuses questions et votre positivité à toute épreuves m'as été précieuses tout au long de mon stage.

Merci à l'ensemble des stagiaires de licence qui m'ont accompagné sur le terrain en dépit des conditions météo et des ronces, sans vous ce rapport n'aurait jamais vu le jour.

Merci à Marion et Maïva et Etienne pour leurs bonnes humeurs et leurs goûts pour l'échange.

Merci à Armando, Éloïse et Guillaume pour leurs très nombreux conseils, et leurs bonnes humeurs à toute épreuve. J'ai fini mon sprint et je vous souhaite bonne chance pour votre marathon !

Merci au personnel de l'Eurométropole de Strasbourg, et en particulier à Tristan et Hugo qui m'ont accompagné tout au long du stage, je vous souhaite le meilleur dans vos projets !

Je te tiens à remercier l'ensemble de mes collègues de master Élise, Sergio, Emma, Félix et Alexis pour leur soutien à toute épreuve, sans vous ce stage n'aurait pas eu la même saveur. Ce n'était pas si mal ! Je vous souhaite à tous le meilleur dans l'avenir.

## RÉSUMÉ

L'augmentation de la population mondiale notamment dans les villes est un des enjeux majeurs pour la biodiversité. Les espaces de nature urbains sont donc de plus en plus importants d'un point de vue écologique, car représentant une plus grande part des espaces naturels dans des milieux fortement urbanisés. Il est nécessaire de comprendre l'écologie propre à ces milieux urbains et dans quelle mesure les fonctions des écosystèmes s'en trouvent perturbées. En ne regardant que la taxonomie des communautés, on ne peut pas rendre compte totalement du fonctionnement des écosystèmes, car deux espèces appartenant au même genre peuvent avoir des caractéristiques complètement différentes, c'est pourquoi l'utilisation de traits fonctionnels est particulièrement adaptée à ce type de milieu. Dans ce but cette étude menée par le Laboratoire Image, Ville, Environnement dans la ville de Strasbourg a pour objectif de faire état de l'utilisation de traits fonctionnels en écologie urbaine, et par cette méthode de décrire la réponse fonctionnelle des communautés végétales herbacées. Pour cela, des relevés ont été effectués sur 60 sites de l'Eurométropole de Strasbourg pour quatre traits fonctionnels : la hauteur reproductive, la surface spécifique foliaire, la taille des fleurs ainsi que la couleur des fleurs. L'effet de l'urbanisation, de la gestion et de la surface a ensuite été testé statistiquement à l'échelle spécifique et à l'échelle communautaire via des modèles linéaire et des modèles linéaires généralisés à effets mixtes. Les résultats montrent entre autres une diminution de la hauteur spécifique en fonction de la gestion ( $F = 4,38$ ,  $p = 0,0087$ ) au niveau spécifique et communautaire. L'étude a également montré une influence de la surface sur la surface spécifique foliaire ( $F = 4,67$ ,  $p = 0,036$ ) et la hauteur reproductive ( $F = 5,90$ ,  $p = 0,031$ ) au niveau spécifique. Enfin, la taille des fleurs a été corrélée avec la gestion ( $F = 4,91$ ,  $p = 0,0049$ ) et l'urbanisation ( $F = 6,05$ ,  $p = 0,002$ ) au niveau communautaire. L'étude nous a permis de montrer que les pressions de gestions et d'urbanisations impact négativement la capacité des plantes à survivre via leurs reproductions et la gestion de leurs ressources, en particulier par la baisse de leur hauteur reproductive. L'étude préconise de diminuer la pression de fauche pour permettre aux espèces de survivre dans le milieu et prédire l'effet d'une perturbation sur ces milieux potentiellement fragile. Une grande variété d'habitat différent indépendamment de leur taille permettrait également de d'augmenter la diversité fonctionnelle des espèces.

**mots-clés** : traits fonctionnels, écologie urbaine, espaces herbacés, couleur des fleurs, surface foliaire spécifique, hauteur reproductive, taille des fleurs, formes urbaines, fauche.

## ABSTRACT

The increase in the world's population, particularly in cities, is one of the major challenges for biodiversity. Urban nature areas are therefore increasingly important from an ecological point of view, as they represent a larger share of natural areas in highly urbanized environments. It is necessary to understand the ecology of these urban environments and the extent to which ecosystem functions are disrupted. By looking only at the taxonomy of communities, we cannot fully account for the functioning of ecosystems, because two species belonging to the same genus can have completely different characteristics, which is why the use of functional traits is particularly suited to this type of environment. This study, conducted by the Laboratoire Image, Ville, Environnement in the city of Strasbourg, aims to report on the use of functional traits in urban ecology, and through this method to describe the functional response of herbaceous plant communities. For this purpose, surveys were carried out on 60 sites of the Eurometropolis of Strasbourg for four functional traits: reproductive height, specific leaf area, flower size and flower color. The effect of urbanization, management and surface area was then statistically tested at the specific and community scales via linear and generalized linear mixed effects models. Results showed, among other things, a decrease in specific height as a function of management ( $F = 4.38$ ,  $p = 0.0087$ ) at the specific and community levels. The study also showed an influence of area on specific leaf area ( $F = 4.67$ ,  $p = 0.036$ ) and reproductive height ( $F = 5.90$ ,  $p = 0.031$ ) at the specific level. Finally, flower size was correlated with management ( $F = 4.91$ ,  $p = 0.0049$ ) and urbanization ( $F = 6.05$ ,  $p = 0.002$ ) at the community level. The study allowed us to show that management and urbanization pressures negatively impact the ability of plants to survive through reproduction and resource management, particularly by decreasing their reproductive height. The study recommends reducing mowing pressure to allow species to survive in the environment and predict the effect of disturbance on these potentially fragile environments. A wide variety of different habitats regardless of size would also increase the functional diversity of species.

**keywords** : functional traits, urban ecology, herbaceous spaces, flower color, specific leaf area, reproductive height, flower size, urban forms, mowing.

# ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné(e) Benjamin Baudon  
déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une  
partie d'un document publiée sur toutes formes de support, y compris l'internet,  
constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée.  
En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées  
pour écrire ce rapport ou mémoire.

signé par l'étudiant(e) le **31 / 08 / 2021**

**Cet engagement de non plagiat doit être signé et joint  
à tous les rapports, dossiers, mémoires.**

Présidence de l'université  
40 rue de rennes – BP 73532  
49035 Angers cedex  
Tél. 02 41 96 23 23 | Fax 02 41 96 23 00

# Rapport bibliographique

## Approche fonctionnelle des plantes



Photo : Espace herbacé de la ville de Strasbourg de type friche, ©Benjamin Baudon

## Table des matières

<b>TABLE DES TABLEAUX.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>2</b>
<b>CONCEPT DE TRAITS FONCTIONNELS.....</b>	<b>3</b>
<b>TRAITS CHOISIS .....</b>	<b>6</b>
1. La hauteur reproductrice .....	6
2. La surface foliaire spécifique (SLA).....	7
3. La taille des fleurs et des inflorescences .....	8
4. La couleur des fleurs .....	10
<b>DISCUSSION .....</b>	<b>12</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>14</b>

## Table des tableaux

Tableau 1 Historique de l'utilisation des traits fonctionnels d'après Nock et al. (2016) .....	3
Tableau 2 classement des traits fonctionnels selon une approche systémique d'après Kearney et al. (2021) .....	4
Tableau 3 Exemple de soft traits et de hard traits chez les plantes terrestres et les organismes aquatiques d'après Nock et al. (2016).....	5

# Introduction

Historiquement, le terme « trait » est naturellement passé du langage commun à un langage plus scientifique, et ce dans différentes disciplines (génétique, écologie physiologique, écologie fonctionnelle, étude de la démographie des populations, concept d'évolution, etc.). À la suite de la proposition de Darwin (1859), les traits ont été utilisés comme prédicteurs (proxies) des performances d'un organisme (Violle et al., 2007). Une « fonction » est quant à elle définie comme l'ensemble des actes accomplis par une structure organique définie en vue d'un résultat déterminé », ou plus simplement « une activité dévolue à un élément d'un ensemble ou à l'ensemble lui-même » (Garnier and Navas, 2013). Le problème avec la définition de fonction en biologie est la notion de résultat déterminé, qui sous-entend qu'il y a dans la nature des buts et objectifs. Ce problème va disparaître avec le darwinisme ou la finalité devient une contribution à la survie et à la fécondité d'un organisme doté d'un trait (Calow, 1987).

Les approches non-taxinomiques de la diversité des plantes sont très anciennes. Dès l'Antiquité, Théophraste classe les végétaux par classe fonctionnelle selon des critères morphologiques (Garnier and Navas, 2013; Nock et al., 2016).

Il est important de définir le terme de biodiversité et de diversité en général pour comprendre ce que l'on cherche et à quel niveau. La plupart des grandes institutions en matière de biologie et d'écologie ont une définition plus ou moins similaire de la biodiversité, comprenant la diversité génétique, la diversité des espèces et la diversité des écosystèmes. Cependant, cette définition ne satisfait pas tous les scientifiques, ce qui a conduit l'apparition de plusieurs autres composantes de cette biodiversité : la biodiversité culturelle, la diversité comportementale et la diversité fonctionnelle (Kaennel, 1998). Le manque le plus important à cette définition est l'absence d'un cadre spatio-temporelle, la biodiversité pouvant être mesurée en un lieu donné ou entre deux planètes, et d'un temps donné à plusieurs millions d'années (Kaennel, 1998). Cependant, il a été établi une échelle de la biodiversité en écologie, qui se définit en 3 types : la diversité alpha qui est la diversité au sein d'un habitat, la diversité bêta entre les habitats et la diversité gamma qui est la diversité totale (Norton, 2008).

Le développement d'une approche fonctionnelle de la diversité a permis de remettre en question les connaissances que l'on a des systèmes écologiques, et présente un potentiel plus important que la diversité taxonomique pour traiter par exemple de la manière dont le fonctionnement des organismes influe sur les écosystèmes, l'assemblage des communautés et de la distribution des organismes le long de gradients de facteur du milieu (Garnier and Navas, 2013). Dans ce sens, les plantes sont des organismes très intéressants, car ils constituent plus de 90 % de la matière vivante des écosystèmes terrestres. L'étude de leurs fonctionnements permet de déterminer la qualité des habitats et des substrats d'un écosystème y compris ceux utilisés par les autres organismes, ainsi que la composition de l'atmosphère et le climat terrestre (Garnier and Navas, 2013).

Ce besoin de comprendre le fonctionnement des organismes et d'évaluer la qualité des habitats est d'autant plus d'actualité pour le milieu urbain. Les écosystèmes urbains sont des écosystèmes récents et fortement modifiés par l'être humain, avec une grande diversité de plantes et d'autres organismes. Leurs fragmentations souvent très fortes ainsi que leurs températures plus élevées en font des modèles convaincants pour étudier les adaptations aux changements globaux (Dubois and Cheptou, 2017). D'autant plus que la diversité floristique est en corrélation avec le développement urbain, les espaces boisés indigènes en milieux urbains peuvent être considérés comme des hotspots pour la survie de nombreuses espèces (Kent et al., 1999).

Le présent travail bibliographique s’inscrit dans le projet de recherche EvolVille, impliquant des compétences variées en écologie, biologie moléculaire, architecture, urbanisme, géomatique et en sciences humaines au sein du Laboratoire Image ville Environnement de Strasbourg. L’objectif du projet est d’appréhender les processus écologiques et évolutifs à l’œuvre dans l’adaptation de la biodiversité aux facteurs anthropiques. Dans ce cadre, l’objectif général de ce stage est d’évaluer la réponse fonctionnelle des espaces herbacés selon deux gradients d’urbanisation : L’artificialisation et la gestion. Pour cela, quatre traits ont été choisis : la couleur, la hauteur reproductive, la surface foliaire spécifique et la taille des fleurs et/ou des inflorescences. L’objectif de ce rapport bibliographique qui sert de préambule à mon rapport analytique est de présenter les concepts et connaissances nécessaires à la compréhension de la variation fonctionnelles des plantes. Pour cela, ce rapport se divise en deux parties : la première définit le concept de trait fonctionnel tel qu’il est utilisé dans des études d’écologie. La deuxième partie fait l’état des connaissances des facteurs qui influencent ou sont influencés par les traits de l’étude. L’objectif général est de comprendre en quoi l’approche fonctionnelle est adaptée au contexte de notre étude, et quels sont les facteurs qui influencent le plus les traits choisis.

## Concept de traits fonctionnels

Les espèces sont différentes, mais pas de manière égale, or de nombreux indices de biodiversité supposent que les espèces ont des degrés de variation identiques. Certaines espèces varient beaucoup en termes de morphologie, de comportement et d’écologie tandis que d’autres ne varient presque pas. Les traits fonctionnels sont un moyen de concilier la dissemblance entre les espèces en décrivant la façon dont les organismes interagissent avec leur environnement et entre eux. Ces traits sont des caractéristiques morphologiques, biochimiques, physiologiques, structurelles, phénologiques ou comportementales des organismes qui influencent les performances ou l’aptitude. L’utilisation de traits fonctionnels est une pratique ancienne qui a connu un nouvel essor avec les problématiques actuelles en écologie (voir Tableau 1) (Nock et al., 2016).

Tableau 1 Historique de l’utilisation des traits fonctionnels d’après Nock et al. (2016)

Year	Author	Concept
300 BC	Theophrastus	<sup>a</sup> Functional plant classification by physical characters (plant height, stem density)
c. 1200	Frederick II (1194–1250)	<sup>b</sup> Classification based on physical characters
1859	Darwin, C	<sup>c</sup> Traits influence organism performance (e.g. beak length)
1934	Raunkiaer, CC	Plant functional classification based on life-form (e.g. plant height)
1963	Odum, E	Functional grouping of organisms (producers, consumers, decomposers)
1979	Grime, JP	Plant functional classification based on common strategies

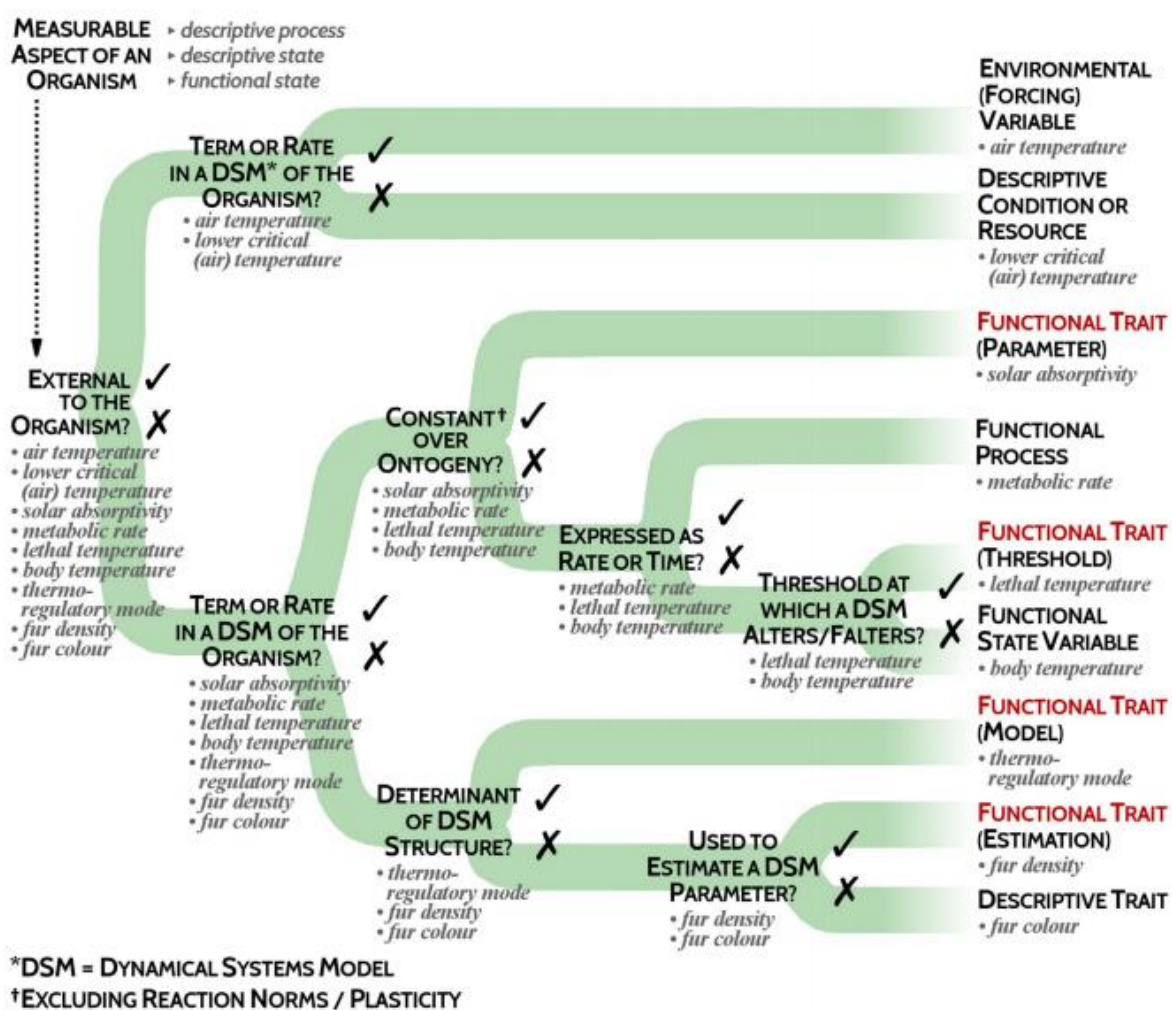
Les traits fonctionnels servent le plus souvent à caractériser les réponses des communautés aux changements de l’environnement, y compris les processus d’assemblage des communautés, et à quantifier l’importance des changements de communauté sur les processus des écosystèmes (Nock et al., 2016). Les traits permettent de comprendre les mécanismes qui régissent les interactions entre les organismes et leurs environnements, ce qui permet de mieux aborder les problématiques de conservation et de restauration actuelles. Le plus souvent les traits utilisés décrivent les propriétés individuelles des organismes qui ont un lien direct avec leurs performances en matière de survie, de développement, de croissance et de reproduction, auquel cas il ne seront pas nommés traits fonctionnels mais traits « descriptifs » (Kearney et al., 2021). On peut également différencier les traits « effet » qui sont ceux qui déterminent l’influence d’une espèce ou d’une communauté sur les propriétés d’un

écosystème et ses fonctions, et les traits « réponse » qui décrivent la capacité des espèces à coloniser ou à prospérer dans un habitat, ainsi que leurs réponses aux changements environnementaux (Nock et al., 2016).

Il existe différentes manières de classer les traits fonctionnels, lorsqu'on les définit par leur rôle dans un système dynamique (voir Tableau 2)(Kearney et al., 2021):

- Les traits fonctionnels « paramètre » : Ce sont les paramètres du modèle.
- Les traits fonctionnels « seuil » : Ce sont des variables seuil qui affectent la performance en mettant fin ou en modifiant le comportement du système.
- Les traits fonctionnels « modèle » : Ils déterminent la structure du modèle.
- Les traits fonctionnels « estimation » : Ce sont des observations permettant d'estimer un paramètre du modèle.

Tableau 2 classement des traits fonctionnels selon une approche systémique d'après Kearney et al. (2021)



De nombreuses études ne parlent pas de traits fonctionnels sans définir les notions de soft traits (traits mous) et de hard traits (traits durs) (tableau 3). Les softs traits sont des traits faciles et rapides à quantifier, mais moins corrélés à des fonctions précises que les hard traits. Les hard traits demandent plus de temps pour être mesurés, et sont plus difficiles à quantifier pour un grand nombre d'espèces, ou à une grande échelle spatiale (Nock et al., 2016). D'une manière générale, on qualifie un trait de hard ou de soft en fonction de la relation entre les traits et les effets ou les réponses des espèces. Les hard traits représentent des

indicateurs précis des fonction des espèces, responsables des réponses de la communauté ou des effets de l'écosystème (Nock et al., 2016). Par exemple chez les plantes terrestres, la taille et la forme des graines sont des soft traits qui permettent d'évaluer le hard trait qui est la capacité de dispersion.

Tableau 3 Exemple de soft traits et de hard traits chez les plantes terrestres et les organismes aquatiques d'après Nock et al. (2016)

Ecological process	Hard trait	Soft trait
<i>Terrestrial plants</i>		
Dispersal	Dispersal capacity	Seed mass Dispersal mode Seed mass and shape
Competitive ability	Competitive effect and response	Height Above-ground biomass
Disturbance response	Vegetative spread Phenology Palatability	Clonality Flowering onset Leaf mass per area Leaf water content
<i>Aquatic organisms</i>		
Dispersal	Dispersal capacity	Resting stage formation Presence of flying stages Clonality
Competitive ability	Clearance (grazing) rates	Body size Feeding apparatus Setae distances
	Nutrient uptake rates	Body size Size: volume ratio
	Growth rates	Body size Size: volume ratio

Pour analyser des traits fonctionnels, on utilise la diversité fonctionnelle. La diversité fonctionnelle (FD) est la variation totale d'un ou de plusieurs traits fonctionnels parmi toutes les espèces d'une communauté (Lefcheck et al., 2015). Si la FD est souvent définie en fonction de la diversité des traits entre les espèces au sein d'une communauté, elle peut être mesurée à d'autres échelles, que ce soit régionale ou même mondiale. Mason et de Bello (2013) proposent de séparer la diversité fonctionnelle régionale (diversité gamma) en composantes intra (diversité alpha) et inter-communautaires (diversité bêta), et la diversité intra-communautaire en composantes intra et inter-espèces. Cette manière de répartir la diversité fait l'objet d'une attention croissante en tant que moyen de hiérarchiser les efforts de conservations, et de mesurer les effets des variables environnementales sur l'assemblage des communautés.

L'approche moderne de la diversité fonctionnelle nécessite d'inclure de multiples traits pour avoir une représentation globale de celle-ci. En effet, les traits multiples permettent d'estimer l'importance de chacun des traits, ainsi que d'estimer la force du lien avec la fonction étudiée ainsi que la présence d'éventuel effets indirects (Lefcheck et al., 2015). Certains traits peuvent aider à quantifier le degré de redondance au sein des assemblages d'espèces, et identifier les écosystèmes et les services vulnérables. À l'inverse, les traits fonctionnels qui discriminent fortement les espèces seront influencés par la richesse spécifique ce qui n'est pas voulu dans une approche fonctionnelle. Les études récentes utilisant des techniques de réduction de la dimensionnalité et de sélection de modèles ont estimé qu'entre trois et cinq traits étaient suffisant pour caractériser complètement les communautés végétales (Lefcheck et al., 2015).

# Traits choisis

## 1. La hauteur reproductive

La hauteur est l'un des traits les plus évidents et les plus étudiés chez les plantes. La hauteur de la plante est utilisée comme trait principal lié à l'aptitude à la compétition des plantes dans les systèmes d'étude des stratégies écologiques (Garnier and Navas, 2013). L'hypothèse générale est qu'être plus grand que ses voisins confère un avantage quant à l'accès à la lumière, et donc constitue un avantage sélectif pour les individus, d'autant plus que les espèces végétales ajustent leur croissance en fonction de la hauteur de la végétation environnante et sont limitées par leur génotype pour suivre les voisins à croissance rapide (Vermeulen et al., 2008). Les plantes les plus hautes font obstacle à la lumière pour les plantes les plus basses, on pourrait donc avancer que toute modification phénotypique ou toute nouvelle espèce présentant une taille supérieure serait immédiatement sélectionnée, or ce n'est pas le cas. La taille des plantes est affectée par une multitude de facteurs, dont certains sont limitants (Falster and Westoby, 2003). La principale limite est le coût alloué à la tige pour le support ainsi que les coûts d'entretien continu notamment via le système vasculaire, la hauteur constituant un désavantage pour le transport de l'eau dans la plante avec des risques de rupture. Cela peut s'observer par la proportion de biomasse dans les feuilles qui diminue avec la hauteur (Falster and Westoby, 2003). Chez les espèces herbacées, il est important de différencier la hauteur végétative de la hauteurs reproductives, car les parties reproductives peuvent être plus hautes que les parties végétatives. On peut observer trois types de stratégies de croissance durant un cycle de vie (Falster and Westoby, 2003; Garnier and Navas, 2013) :

- Une maximisation de la croissance végétative en hauteur suivie d'une maximisation du développement des parties reproductives,
- Un détournement progressif de la croissance végétative vers la croissance reproductive.
- Une croissance simultanée des parties végétative et reproductive.

L'investissement total dans une croissance végétative puis reproductive a un rendement final plus élevé que les autres méthodes (Falster and Westoby, 2003). Les plantes les plus précoces phénologiquement ont également tendance à être plus petites que les espèces qui ont un temps de floraison plus long (Bolmgren and D. Cowan, 2008).

Ce lien entre croissance reproductive et hauteur nous permet d'aborder un autre mécanisme fortement influencé par la hauteur : la reproduction. Les arbres voient leurs distances de dispersions augmentées proportionnellement avec la hauteur, et une hauteur reproductive plus élevée chez les plantes herbacées conduit à une pollinisation et une dissémination des graines plus efficaces. Ceci peut expliquer que les plantes des milieux prairiaux investissent de grandes quantités de ressources au développement de leurs parties reproductives, notamment les espèces en rosette (Garnier and Navas, 2013).

Thomson et al. (2011) ont montré que la distance de dispersion des graines était plus corrélée à la hauteur de la plante qu'à la masse de ses graines. En effet, une augmentation de 100 fois la masse des graines multiplie la distance de dispersion par 4,5 alors qu'une augmentation de 5 fois la hauteur suffit à multiplier la distance de dispersion par 4,6. Les auteurs ont également constaté qu'en tenant compte de la hauteur, les espèces à petites graines avaient une meilleure dispersion que les espèces à grandes graines, mais avec une faible augmentation du pourcentage explicatif (2 %), et donc peu d'influence en comparaison à la hauteur.

Chez les plantes herbacées, une augmentation de la hauteur est également corrélée avec un diamètre de la tige et une surface moyenne de section transversale racinaire plus importante. Cela contribue à un meilleur ancrage au sol ainsi qu'au développement de racines plus profondes pour avoir une meilleure stabilité. Cet enracinement profond dû à la hauteur de la plante permettrait d'avoir accès à des ressources hydriques plus importantes en période de sécheresse ou l'eau disparaît des parties les moins profondes du sol. Cela est tout de même à mettre en relation avec la surface foliaire et la régulation de la transpiration afin d'établir les conséquences possibles sur le statut hydrique des plantes (Garnier and Navas, 2013).

Les facteurs environnementaux ont un effet sur la hauteur des plantes. Globalement, des sols chauds et riches en nutriments avec une forte pluviométrie sont propices à une augmentation de la hauteur des plantes. Cela a été confirmé par Mao et al. (2020) qui ont étudié la distribution géographique et climatique de plus de 19,000 espèces d'angiospermes en Chine. Les résultats de l'étude ont montré que la hauteur maximale moyenne des communautés était plus élevée dans les régions où les températures et les précipitations annuelles sont les plus importantes. La limite supposée de la température sur la hauteur au-delà d'un certain stade (perte hydrique trop importante) semblent être compensée par les précipitations importantes. Ils observent également que les plantes herbacées sont plus hautes lorsque les variations climatiques étaient les moins importantes.

Pour comparer les espèces végétales au niveau global il faut tenir compte des différences dues à la latitude. En effet dans une étude de Moles et al. (2009), la hauteur maximale moyenne des espèces situées à moins de 15° de l'équateur (7,8 m) était 29 fois supérieure à celle des espèces situées entre le 60° et le 75° parallèle Nord (27 cm), et 31 fois supérieure à celle des espèces situées entre le 45° et le 60° parallèle Sud (25 cm). Rien n'indique que la hauteur était différente dans les hémisphères Nord ou Sud, ce qui soutient l'idée qu'il y a un changement de stratégie entre les zones tempérées et les zones tropicales.

Pour finir, il s'avère que les fluctuations de taux de croissance dues à la stochasticité environnementale augmentent la vulnérabilité à l'extinction des espèces. Les grandes espèces végétales sont moins vulnérables que les petites espèces végétales (de Jonge et al., 2018).

## 2. La surface foliaire spécifique (SLA)

La surface spécifique foliaire (SSF ou SLA en anglais pour Specific Leaf Area), aussi appelée masse foliaire par unité de surface ou masse foliaire spécifique, est définie comme la surface foliaire par unité de biomasse foliaire sèche (en  $\text{m}^2/\text{kg}$ ). Elle est un des liens importants entre les cycles du carbone et de l'eau des plantes, car elle décrit la distribution de la biomasse végétale par rapport à la surface foliaire au sein d'un couvert végétal. C'est une variable très étudiée et présente dans de nombreux modèles d'écosystème à grande échelle (Pierce et al., 1994). Elle est également l'un des traits principaux pour l'axe fondamental de variations chez les plantes qu'est la gestion des ressources. Elle a été privilégiée à d'autres indices foliaires car elle est facile, rapide et économique à mesurer (Garnier and Navas, 2013). Ainsi, des changements dans la SLA reflètent des changements dans la structure et le contenu nutritionnel des feuilles, principalement par la concentration d'amidon et de sucres, en raison de l'augmentation du taux de photosynthèse qui augmente le rapport C/N, et donc réduit la valeur nutritionnelle des feuilles (Gong and Gao, 2019). La SLA augmente lorsque la lumière baisse en intensité en passant à travers le couvert végétal, elle est atténuée par la surface foliaire. Dans un écosystème, la SLA va donc être significativement corrélée aux caractéristiques de l'indice de

surface foliaire (ISF obtenable à partir d'estimation satellitaire) et de la transmittance de la canopée (Pierce et al., 1994). En effet, on observe que la plupart du temps, les feuilles en plein soleil ont des SLA plus faibles que les feuilles les plus à l'ombre, montrant une distribution de la SLA dans le couvert végétal qui est lié à la capacité photosynthétique du couvert (Pierce et al., 1994). La SLA augmente lorsque l'épaisseur de la feuille diminue, ce qui signifie que les feuilles les plus épaisses ont un taux de photosynthèse plus faible par gramme de masse sèche foliaire. Dans une feuille plus épaisse, les chloroplastes des parties inférieures sont à l'ombre, ce qui diminue la fixation nette de carbone sur la base de la masse de la feuille (Meziane, 2001). Cela est toutefois contredit dans l'étude de An and Shangguan (2008), où des individus de *Trifolium repens* L. ont été cultivés dans des conditions contrôlées d'azote et d'intensité lumineuse. Les effets de l'azote et de l'intensité lumineuse ont été identiques : plus l'azote et l'intensité étaient élevés, plus les valeurs de SLA étaient élevées. Cela pourrait induire que la présence du couvert végétal change la conformation des feuilles des espèces, ou que l'intensité lumineuse n'a plus d'effet dans un milieu riche en azote.

En effet la SLA & une corrélation positive avec le taux de nutriment dans le sol. La SLA diffère selon les espèces et augmente avec des niveaux croissants d'azote. Le long d'un gradient d'azote, la SLA moyenne va augmenter drastiquement ce qui sera expliqué en partie par l'augmentation de la SLA des espèces et d'autre part par le remplacement des espèces. A long terme l'augmentation de l'azote dans un milieu entraîne un changement de la SLA au sein des espèces comme des communautés végétales. Cela s'explique par la corrélation entre la SLA et la concentration d'azote dans les feuilles (Knops and Reinhart, 2000). Si une augmentation de la concentration d'azote dans le sol entraîne une augmentation de la SLA, un taux d'azote plus important dans les feuilles diminue la valeur de SLA. En effet la réduction de la SLA est corrélée à une augmentation de l'azote foliaire par unité de surface foliaire, cela entraîne notamment une augmentation globale de l'utilisation de l'eau par les plantes (Pierce et al., 1994).

La SLA est aussi influencée par les facteurs climatiques en plus des facteurs du sol. L'étude de Gong and Gao (2019) montre une forte corrélation de la SLA avec le pH et avec les précipitations annuelles, ainsi qu'avec l'interaction entre ces deux facteurs. Il a également été observé que les plantes d'altitudes ont toujours une SLA plus faible et un taux d'azote foliaire plus élevé que les mêmes espèces à des altitudes plus basses (Pierce et al., 1994). La comparaison des SLA de plantes cultivées de manière artificielle avec des plantes de champs montre des taux plus faibles dans les champs ce qui serait dû à l'apport généralement moins important en lumière dans les serres, la faible quantité d'azote dans les milieux de manière générale, mais également au fait que les plantes de plein air sont soumises à des mouvements d'air plus violents (Poorter and De Jong, 1999).

### 3. La taille des fleurs et des inflorescences

Les traits des fleurs présentent une étonnante diversité morphologique y compris pour leur taille qui varie considérablement entre espèces, mais également entre individus et entre populations. Cela est dû en grande partie à des facteurs héréditaires. En effet, la variation de la taille des fleurs peut contribuer à l'isolement reproductif des espèces et a donc des conséquences sur l'évolution (Galen, 1999; Krizek and Anderson, 2013). Il a été montré que la taille des fleurs et leur nombre ont une corrélation négative significative, ce qui signifie que des fleurs de petites tailles peuvent souvent être en grand nombre et inversement (Sargent, 2007). Bien que moins utilisé que la forme des fleurs, la taille des fleurs présente un intérêt pour leur importance fonctionnelle dans un processus : la reproduction, et plus particulièrement la pollinisation (Dafni and Kevan, 1997).

En effet, chaque catégorie de pollinisateur (coléoptères, abeilles de différentes tailles, etc.) est associée à un assemblage de caractéristiques florales unique en termes de taille, de forme et de récompense. Il a été montré lors de l'utilisation de fleurs artificielles que les cibles les plus grandes étaient choisies à de plus grandes distances par les papillons et les abeilles. La taille des fleurs et des inflorescences augmente en moyenne le taux de visites des pollinisateurs (Dafni and Kevan, 1997). Cette taille des fleurs varie également en fonction de la taille des pollinisateurs, ce qui est dû à leur évolution commune. L'étude menée par Kuriya et al. (2015) sur la variation de la taille des fleurs de l'espèce *Prunella vulgaris* L. dans un gradient altitudinal à montrer que la longueur des fleurs était fortement corrélée aux variations de la trompe des pollinisateurs. Les chercheurs ont mis en évidence une variation géographique dans l'assemblage de pollinisateurs de la brunelle le long d'un gradient altitudinal, et donc un changement de la longueur moyenne des trompes de pollinisateurs. La brunelle présentait également un changement de longueur de fleurs selon le gradient altitudinal, cependant ce changement de longueur était uniquement corrélé au changement de taille de trompe des pollinisateurs, mais pas avec l'altitude elle-même. Cela suggère que la sélection induite par les pollinisateurs peut influencer la variation spatiale de la taille des fleurs, en tout cas pour ce qui est de l'échelle fine.

Ce lien entre taille des fleurs et pollinisateur pourrait expliquer les différences de tailles entre les fleurs bilatérales et les fleurs radiales. Krizek and Anderson (2013) montrent qu'une fleur bilatérale a une variation de taille moins importante, et est visitée par moins de groupe de pollinisateurs. Cette diversité des pollinisateurs pourrait expliquer jusqu'à 40% des différences de variance de la taille des fleurs entre les espèces bilatérales et radiales. Une autre étude avance que cette variation pourrait être due à une sélection favorisant le placement précis du pollen sur le pollinisateur, indépendamment du type de pollinisateur (Nikkeshi et al., 2015). Au vu de l'influence de la pollinisation sur la taille des fleurs, on peut supposer que le mode de pollinisation a également une influence sur ce trait. Il a été observé que les espèces qui s'autopollinisent de manière autonome ont tendance à avoir des fleurs de plus petites tailles que les espèces allogames ou autogames qui nécessitent la visite de pollinisateurs (Krizek and Anderson, 2013). La même étude suggère que les génotypes à petite fleurs capables de s'autoféconder de manière autonome ont un avantage sélectif lorsque les pollinisateurs sont rares.

Si la pollinisation est à l'origine d'une augmentation de la taille des fleurs, d'autres paramètres existent qui vont limiter cette augmentation. Les études récentes suggèrent que la sélection de la taille est un processus pluraliste, impliquant les pollinisateurs, mais également les ennemis et les paramètres abiotiques. Les caractéristiques des fleurs ont des rôles défensifs en plus de leurs fonctions attractives, et si l'abondance des ennemis augmente dans un habitat, les pressions de sélections contradictoires entre attractivité et défense vont maintenir une variation de la taille des fleurs et des organes floraux (Galen, 1999) d'autant plus que l'abondance des ennemis naturels augmente avec la floraison et l'augmentation de la surface florale (Fiedler and Landis, 2007). Les prédateurs de graines peuvent être attirés par les mêmes caractéristiques florales que les pollinisateurs ce qui diminue l'investissement des plantes dans des fleurs attrayantes (Krizek and Anderson, 2013). Cela est confirmé dans l'étude de Fenner et al. (2002) portant sur 20 espèces herbacées communes d'Astéracées provenant d'habitats prairiaux, où la présence de larves d'insectes mangeurs de graines augmentait avec la taille du capitule. Des espèces comme *Achillea millefolium* étaient exemptes de larves sur leurs bourgeons tandis que des espèces comme *Arctium minus* étaient fortement infestées. La même interaction a été observée au sein des espèces, ce qui suggère en plus d'une influence sur les communautés herbacées, une sélection naturelle des petites fleurs en opposition à celle induite par les pollinisateurs.

La prédation n'est pas le seul facteur qui pourrait être limitant dans l'augmentation de la taille des fleurs. Un de ces facteurs d'influence est le coût en ressources des fleurs pour la plante. En effet, les organes floraux nécessitent du carbone, des nutriments et de l'eau qu'ils vont tirer de la partie végétative de la plante, que ce soit au moment de l'expansion initiale ou tout au long de la vie de la fleur. Dans les environnements où les ressources sont limitées, l'allocation de ces ressources à la floraison peut être néfaste à la croissance et à la survie futures de la plante. Lorsque la taille qui optimise l'attrait pour les pollinisateurs diffère de la taille optimale pour la gestion des ressources, les divergences de fleurs sont favorisées au sein des populations (Galen, 1999).

Enfin, la taille de la fleur n'influe pas sur la reproduction uniquement par son lien avec les fonctions de pollinisations, mais également avec la dispersion. On suggère que la plupart des angiospermes peuvent être classés en deux catégories : ceux avec de grandes fleurs et de nombreux fruits à graines, et ceux avec de petites fleurs et des fruits à graines uniques ou peu nombreux (Bawa et al., 2019).

## 4. La couleur des fleurs

La couleur des fleurs est un trait encore peu représenté dans les études qui utilisent les traits fonctionnels, pourtant extrêmement étudié pour sa relation étroite et ancienne avec la pollinisation. En effet, la grande variation de couleurs chez les plantes à fleurs est liée à leur évolution commune avec leurs pollinisateurs. Chittka and Menzel (1992) comparent le spectre de réflexion de 180 fleurs d'angiospermes avec les photorécepteurs de 40 espèces d'hyménoptères. Cette analyse montre une correspondance entre les trois pics de longueurs d'onde observé chez les plantes (400, 500 et 600 nm) et les longueurs d'onde optimales des hyménoptères due à leurs trois types de photorécepteurs (340, 440 et 530 nm) en particulier pour les couleurs bleus et verte. Les hyménoptères n'ont pas de récepteurs pour les couleurs rouge (600 nm) alors qu'il y a une émission chez les fleurs. Cette émission est cependant visible par les espèces d'insecte possédant quatre récepteurs comme les papillons et les coléoptères. Les espèces ayant une forte émission dans le rouge sont également celles qui sont le plus visitées par les oiseaux pollinisateurs qui ont une sensibilité visuelle au bleu faible, et plus élevée dans les grandes longueurs d'ondes (Toledo and Donatelli, 2010). Les espèces végétales qui arrivent à se démarquer visuellement voient leurs fitness augmenter tandis que les insectes qui arrivent le mieux à différencier les fleurs voient également leurs fitness augmenter, entraînant la grande diversité et la spécialisation entre insecte pollinisateurs et angiospermes. Ce mécanisme de perception des fleurs par l'insecte pollinisateur va être multifactoriel avec une association forte entre la couleur et la présence de composés volatiles, qui va favoriser la constance florale notamment chez les abeilles, c'est-à-dire leurs tendances à exploiter une seule ressource florale tant qu'elles leur procurent une récompense (Martínez-Harms et al., 2018). La spécification des plantes, leurs tendances à augmenter les différences d'apparences dans un milieu, à un impact positif sur cette constance.

Cette proportion des plantes à avoir un contraste chromatique important pour se rendre visible qui est encouragé par les pollinisateurs est contrebalancé par le fait que les fleurs se rendent également plus visible pour les insectes herbivores. Par exemple, il a été observé chez *Geranium thunbergii* une préférence des prédateurs pour les fleurs blanches plutôt que pour les fleurs roses, ce qui est également le cas pour les pollinisateurs (Tsuchimatsu et al., 2014). Cependant les études menées sur *Raphanus sativus* ont observés une préférence des pollinisateurs pour les morphes de couleurs jaune et blanc plutôt que les morphes rose et bronze, or cette préférence ne se retrouve pas chez les herbivores malgré la plus grande visibilité des fleurs

blanches. Cela est dû au fait que la plante produirait des concentrations plus importantes de glucosinolate d'indoles (molécules de défenses contre les herbivores, à l'origine du goût amer ou piquant de la moutarde, du radis, etc.) dans les morphes blancs que dans les morphes roses en présence de dommages causés par les herbivores (Irwin et al., 2003). Cela signifie qu'en plus de la pollinisation les herbivores ont un rôle dans le maintien du polymorphisme chez les fleurs, et que les plantes peuvent adopter des mécanismes permettant de limiter la contrainte des herbivores en comparaison à l'interaction avec les pollinisateurs. Cette réaction défensive peut cependant dans certain cas entraîner une perturbation dans les interactions avec les pollinisateurs (Rusman et al., 2019).

A l'origine de la couleur des fleurs, ce sont des composés synthétisés par les voies de biosynthèse des phénylpropanoïdes, des caroténoïdes et des bétalaines qui donnent aux pétales et aux pollen une pigmentation spécifique en fonction du tissu. La voie phénylpropanoïdes est celle qui produit les flavonoïdes non pigmentés, ainsi que les anthocyanines qui sont les principaux pigments des fleurs (Borghi et al., 2019). Ces composés voient leurs concentrations variées avec les composés environnementaux, et bien que l'interaction plante-pollinisateurs soit considérée comme le facteur majeur d'influence de la couleur, la variation des composés aux conditions abiotiques constitue la première sélection de la couleur chez les plantes (Arista et al., 2013).

Parmi ces facteurs abiotiques, le rayonnement solaire est un des facteurs qui influence grandement la concentration en pigment des fleurs. En effet les anthocyanes, présentent chez presque toutes les angiospermes, sont apparues dans les tissus végétatifs en réponse à l'augmentation de la lumière ultraviolette et à la sécheresse et conservent leurs rôles liés au stress tout en servant l'attrait des pollinisateurs (Arista et al., 2013). En moyenne, les fleurs auraient plus de pigment lorsque le rayonnement solaire est élevé, et la biosynthèse de ces pigments est également fortement influencée par le nombre d'heures d'ensoleillement (Dalrymple et al., 2020). L'augmentation d'anthocyanes permet de protéger les fleurs et les fruits des dommages causé par les ultraviolets, et cela permet d'expliquer la grande proportion de fleurs vivement colorées dans les régions alpines et tropicales qui sont des zones à forte lumière ultraviolette (Zhao et al., 2014).

En plus de la lumière, la température est un facteur de stress majeur qui peut expliquer des variations de couleur des fleurs. La température a un effet sur l'accumulation des anthocyanes : lorsque la température est élevée les couleurs de fleurs sont plus claires en raison d'une réduction de la teneur en anthocyanes tandis que à l'inverse, des températures basses entraîne une augmentation de la teneur en anthocyanes des plantes, notamment chez le plantain (Zhao et al., 2014). Les études de Anderson et al. (2013) et de Lacey and Herr (2005) ont toutes deux permis de constater une plasticité phénotypique chez *Plantago lanceolata* en lien direct avec la température. En effet dans les deux études la réflexion florale à augmenter avec la température, en particulier dans les domaines du visible et de l'infrarouge. Cela serait dû au fait que les inflorescences les plus sombres monteraient plus vite en température que les inflorescences les plus claires, la baisse de pigmentation aurait alors un rôle de thermorégulation pour la reproduction et pour assurer le développement des graines. Cette réaction est réversible et a été observée chez l'ensemble du genre *Plantago*, la plasticité thermique serait donc un trait ancestral du genre.

La disponibilité en eau est également une variable qui peut affecter directement la couleur des plantes. Il existe une corrélation négative entre la disponibilité en eau et la quantité d'anthocyane produite par les plantes, de faibles précipitations vont favoriser des morphes floraux très coloré par rapport aux fleurs non pigmentées (Dalrymple et al., 2020). Une teneur en eau suffisante va également permettre de conserver les couleurs inhérentes des fleurs pendant une période plus longue, avec un

assombrissement en cas de carence (Zhao et al., 2014). Ces mêmes précipitations ont un effet indirect supplémentaire sur la couleur en modifiant les conditions du sol, notamment par la modification de son pH, ce qui va accentuer d'autant plus la baisse de production de pigments des fleurs saturées en eau (Dalrymple et al., 2020). En effet, le pH joue un rôle important dans la couleur des fleurs l'exemple le plus connu étant celui des hortensias qui vont avoir une couleur bleue en dessous d'un pH de 5,5, lavande entre 5,5 et 6,5 et rose ou rouge à plus de 6,5 de pH. L'acidification du sol et des eaux d'irrigation affecte la synthèse des anthocyanes que ce soit dans les feuilles ou dans les fleurs (Zhao et al., 2014). La salinité va également tenir un rôle en diminuant la production d'anthocyanes, entraînant une perte de couleur visuellement perceptible (Trivellini et al., 2014). En plus des facteurs abiotiques précédemment cité, l'environnement proche dans lequel se situent les plantes peut influencer également sur la couleur des fleurs. Par exemple, l'environnement lumineux a une influence sur les couleurs biologiques, car il peut modifier la visibilité des signaux de couleurs. Cet environnement lumineux est construit par la structure physique des habitats, avec plusieurs aspects qui peuvent l'influencer comme la hauteur de la végétation, l'indice de surface foliaire et la couverture nuageuse (Dalrymple et al., 2020).

## Discussion

La couleur des fleurs, leurs tailles et la hauteur de végétation sont des traits qui permettent de retranscrire la fonction de reproduction des écosystèmes au travers du mécanisme de pollinisation. Pour cela, elles semblent être de bons traits pour évaluer la réponse actuelle des prairies herbacées dans un gradient d'urbanisation. Cependant, comme nous avons pu le voir ce sont des soft traits qui ne permettent pas d'évaluer directement ce processus comme le feraient la mesure du taux de visite de pollinisateurs ou le taux de pollen viable. Aussi, il faut faire attention aux autres paramètres explicatifs concernant ces traits tel que la lumière, la température et l'herbivorie. La SLA quant à elle, permet d'avoir plus directement un aperçu de la gestion des ressources des espèces dans un environnement donné, mais elle est à mettre en relation également avec la luminosité.

Dans cette optique, les études menées sur des soft traits doivent tenir compte d'un maximum de variable contrôle afin de comprendre la part de chaque facteur dans l'expression des traits. Les facteurs les plus importants pour les plantes sont la luminosité, la température, la nature du sol et son apport en nutriments, l'interaction avec les autres espèces qu'elle soit animal ou végétal, ainsi que la ressource en eau. L'application d'une telle étude dans un contexte urbain aura pour enjeu principal de bien cerner les paramètres propres à ce milieu, en particulier les facteurs anthropiques tels que la gestion, la pollution, la fréquentation, ainsi que l'artificialisation des sols.

La plupart des études s'accordent pour dire que les études fonctionnelles doivent être multifactorielles pour bien retranscrire les mécanismes des écosystèmes. Pour cela, il est également indispensable de définir l'échelle à laquelle on veut comparer nos traits, qui peut être intra ou intercommunautaire au niveau de la région, mais également intra ou interspécifique au niveau des communautés. Il y a également la question de la convergence des traits par le biais de l'évolution, en particulier pour les questions liées au processus évolutif, qui doit être prise en compte via la définition de la parenté phylogénétique qui doit être déterminé lors de la comparaison des traits entre les communautés (Nock et al., 2016). Il peut également y avoir un degré de variation intraspécifique des traits plus ou moins variable qui fait que les valeurs moyennes des traits ne sont pas toujours

significatives en particulier lorsque les variances ont des chevauchements importants entre espèces. Cette variation intraspécifique est particulièrement importante dans un contexte éco-évolutif, en permettant d'évaluer comment les populations d'une communauté peuvent montrer plus ou moins de rigidité face aux changements environnementaux (Nock et al., 2016).

Quoiqu'il en soit, les synthèses récentes et les études empiriques mettent en évidence que les traits fonctionnelles prédisent mieux les effets des changements globaux sur les fonctionnalités écosystémiques que la diversité des espèces (Mason and de Bello, 2013). De nouvelles études tendent à inclure les traits pour la description des fonctions culturelles des écosystèmes, notamment en milieu urbain. Une étude de Goodness et al. (2016) propose d'intégrer la notion de traits fonctionnels dans les planifications urbaines actuelles, une approche de la gestion basée sur les traits fonctionnels pouvant s'avérer particulièrement importante et utile dans les écosystèmes urbains. Par exemple, il a été suggéré que les caractéristiques de la taille de la plante pourraient avoir une influence sur les préférences esthétique. Dans la majorité des études, les grands arbres sont préférés aux petits en milieu urbain, et la préférence visuelle augmente avec le diamètre moyen et la surface basale. De même, une préférence est faite pour les environnements fleuris avec des grandes fleurs, les fleurs colorées sont préférées en particulier lorsqu'il y a une variété de couleurs importante dans les contextes de toits verts, sites industriels, commerciaux et des jardins botaniques urbains. Enfin, les environnements qui ont des paysages complexes avec une multitude d'habitats sont privilégiés dans tous les types d'activités.

Les traits fonctionnels permettent de mieux comprendre la réponse fonctionnelle des écosystèmes dans un contexte d'environnement en changement constant au vu du réchauffement climatique globale et de l'urbanisation croissante dans le monde. Ils semblent être le meilleur outil pour mettre en œuvre la restauration, le suivi, la conservation et l'aménagement des habitats dans le souci de garder un équilibre des écosystèmes.

# Bibliographie

- An, H., Shangguan, Z.P., 2008. Specific leaf area, leaf nitrogen content, and photosynthetic acclimation of *Trifolium repens* L. seedlings grown at different irradiances and nitrogen concentrations. *Photosynth.* 46. <https://doi.org/10.1007/s11099-008-0023-y>
- Anderson, E.R., Lovin, M.E., Richter, S.J., Lacey, E.P., 2013. Multiple *Plantago* species (Plantaginaceae) modify floral reflectance and color in response to thermal change. *American Journal of Botany* 100, 2485–2493. <https://doi.org/10.3732/ajb.1300180>
- Arista, M., Talavera, M., Berjano, R., Ortiz, P.L., 2013. Abiotic factors may explain the geographical distribution of flower colour morphs and the maintenance of colour polymorphism in the scarlet pimpernel. *J Ecol* 101, 1613–1622. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12151>
- Bawa, K.S., Ingty, T., Revell, L.J., Shivaprakash, K.N., 2019. Correlated evolution of flower size and seed number in flowering plants (monocotyledons). *Annals of Botany* 123, 181–190. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy154>
- Bolmgren, K., D. Cowan, P., 2008. Time - size tradeoffs: a phylogenetic comparative study of flowering time, plant height and seed mass in a north-temperate flora. *Oikos* 117, 424–429. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0030-1299.16142.x>
- Borghi, M., Perez de Souza, L., Yoshida, T., Fernie, A.R., 2019. Flowers and climate change: a metabolic perspective. *New Phytol* 224, 1425–1441. <https://doi.org/10.1111/nph.16031>
- Calow, P., 1987. Towards a Definition of Functional Ecology. *Functional Ecology* 1, 57. <https://doi.org/10.2307/2389358>
- Chittka, L., Menzel, R., 1992. The evolutionary adaptation of flower colours and the insect pollinators' colour vision. *J Comp Physiol A* 171. <https://doi.org/10.1007/BF00188925>
- Dafni, A., Kevan, P.G., 1997. FLOWER SIZE AND SHAPE: IMPLICATIONS IN POLLINATION. *Israel J Plant Sci* 45, 201–211. <https://doi.org/10.1080/07929978.1997.10676684>
- Dalrymple, R.L., Kemp, D.J., Flores-Moreno, H., Laffan, S.W., White, T.E., Hemmings, F.A., Moles, A.T., 2020. Macroecological patterns in flower colour are shaped by both biotic and abiotic factors. *New Phytol* 228, 1972–1985. <https://doi.org/10.1111/nph.16737>
- de Jonge, M.M.J., Hilbers, J.P., Jongejans, E., Ozinga, W.A., Hendriks, A.J., Huijbregts, M.A.J., 2018. Relating plant height to demographic rates and extinction vulnerability. *Biological Conservation* 220, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.02.008>
- Dubois, J., Cheptou, P.-O., 2017. Effects of fragmentation on plant adaptation to urban environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 372, 20160038. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0038>
- Falster, D.S., Westoby, M., 2003. Plant height and evolutionary games. *Trends in Ecology & Evolution* 18, 337–343. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00061-2](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00061-2)
- Fenner, M., Cresswell, J., Hurley, R., Baldwin, T., 2002. Relationship between capitulum size and pre-dispersal seed predation by insect larvae in common Asteraceae. *Oecologia* 130, 72–77. <https://doi.org/10.1007/s004420100773>
- Fiedler, A.K., Landis, D.A., 2007. Plant Characteristics Associated with Natural Enemy Abundance at Michigan Native Plants. *ENVIRONMENTAL ENTOMOLOGY* 36, 9.
- Galen, C., 1999. Why Do Flowers Vary? *BioScience* 49, 631–640. <https://doi.org/10.2307/1313439>
- Garnier, M.E., Navas, M.M.-L., 2013. Diversité fonctionnelle des plantes. *De Boeck Supérieur*.
- Gong, H., Gao, J., 2019. Soil and climatic drivers of plant SLA (specific leaf area). *Global Ecology and Conservation* 20, e00696. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00696>
- Goodness, J., Andersson, E., Anderson, P.M.L., Elmqvist, T., 2016. Exploring the links between functional traits and cultural ecosystem services to enhance urban ecosystem management. *Ecological Indicators* 70, 597–605. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.031>
- Irwin, R.E., Strauss, S.Y., Storz, S., Emerson, A., Guibert, G., 2003. THE ROLE OF HERBIVORES IN THE MAINTENANCE OF A FLOWER COLOR POLYMORPHISM IN WILD RADISH. *Ecology* 84, 1733–1743. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2003\)084\[1733:TROHIT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2003)084[1733:TROHIT]2.0.CO;2)
- Kaennel, M., 1998. Biodiversity: A Diversity in Definition, in: Bachmann, P., Köhl, M., Päivinen, R. (Eds.), *Assessment of Biodiversity for Improved Forest Planning*, Forestry Sciences. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 71–81. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9006-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9006-8_7)
- Kearney, M.R., Jusup, M., McGeoch, M.A., Kooijman, S.A.L.M., Chown, S.L., 2021. Where do functional traits come from? The role of theory and models. *Funct Ecol* 35, 1385–1396. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13829>
- Kent, M., Stevens, R.A., Zhang, L., 1999. Urban plant ecology patterns and processes: a case study of the flora of the City of Plymouth, Devon, U. K. *J Biogeography* 26, 1281–1298. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1999.00350.x>
- Knops, J.M., Reinhart, K., 2000. Specific Leaf Area Along a Nitrogen Fertilization Gradient. *The American Midland Naturalist* 144, 265–272. [https://doi.org/10.1674/0003-0031\(2000\)144\[0265:SLAAAN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1674/0003-0031(2000)144[0265:SLAAAN]2.0.CO;2)
- Krizek, B.A., Anderson, J.T., 2013. Control of flower size. *Journal of Experimental Botany* 64, 1427–1437. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert025>
- Kuriya, S., Hattori, M., Nagano, Y., Itino, T., 2015. Altitudinal flower size variation correlates with local pollinator size in a bumblebee-pollinated herb, *Prunella vulgaris* L. (Lamiaceae). *J. Evol. Biol.* 28, 1761–1769. <https://doi.org/10.1111/jeb.12693>
- Lacey, E.P., Herr, D., 2005. Phenotypic plasticity, parental effects, and parental care in plants? I. An examination of spike reflectance in *Plantago lanceolata* (Plantaginaceae). *Am. J. Bot.* 92, 920–930. <https://doi.org/10.3732/ajb.92.6.920>

- Lefcheck, J.S., Bastazini, V.A.G., Griffin, J.N., 2015. Choosing and using multiple traits in functional diversity research. *Envir. Conserv.* 42, 104–107. <https://doi.org/10.1017/S0376892914000307>
- Mao, L., Swenson, N.G., Sui, X., Zhang, J., Chen, S., Li, J., Peng, P., Zhou, G., Zhang, X., 2020. The geographic and climatic distribution of plant height diversity for 19,000 angiosperms in China. *Biodivers Conserv* 29, 487–502. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01895-5>
- Martínez-Harms, J., Warskulat, A., Dudek, B., Kunert, G., Lorenz, S., Hansson, B.S., Schneider, B., 2018. Biosynthetic and Functional Color–Scent Associations in Flowers of *Papaver nudicaule* and Their Impact on Pollinators. *ChemBioChem* 19, 1553–1562. <https://doi.org/10.1002/cbic.201800155>
- Mason, N.W.H., de Bello, F., 2013. Functional diversity: a tool for answering challenging ecological questions. *J Veg Sci* 24, 777–780. <https://doi.org/10.1111/jvs.12097>
- Meziane, D., 2001. Direct and Indirect Relationships Between Specific Leaf Area, Leaf Nitrogen and Leaf Gas Exchange. Effects of Irradiance and Nutrient Supply. *Annals of Botany* 88, 915–927. <https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1536>
- Moles, A.T., Warton, D.I., Warman, L., Swenson, N.G., Laffan, S.W., Zanne, A.E., Pitman, A., Hemmings, F.A., Leishman, M.R., 2009. Global patterns in plant height. *Journal of Ecology* 97, 923–932. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01526.x>
- Nikkeshi, A., Kurimoto, D., Ushimaru, A., 2015. Low flower-size variation in bilaterally symmetrical flowers: Support for the pollination precision hypothesis. *American Journal of Botany* 102, 2032–2040. <https://doi.org/10.3732/ajb.1500371>
- Nock, C.A., Vogt, R.J., Beisner, B.E., 2016. Functional Traits, in: John Wiley & Sons Ltd (Ed.), ELS. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0026282>
- Norton, B.G., 2008. Toward a Policy-Relevant Definition of Biodiversity, in: Askins, R.A., Dreyer, G.D., Visgilio, G.R., Whitelaw, D.M. (Eds.), *Saving Biological Diversity*. Springer US, Boston, MA, pp. 11–20. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-09565-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-0-387-09565-3_2)
- Pierce, L.L., Running, S.W., Walker, J., 1994. Regional-Scale Relationships of Leaf Area Index to Specific Leaf Area and Leaf Nitrogen Content. *Ecological Applications* 4, 313–321. <https://doi.org/10.2307/1941936>
- Poorter, H., De Jong, R., 1999. A comparison of specific leaf area, chemical composition and leaf construction costs of field plants from 15 habitats differing in productivity. *New Phytol* 143, 163–176. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00428.x>
- Rusman, Q., Poelman, E.H., Nowrin, F., Polder, G., Lucas-Barbosa, D., 2019. Floral plasticity: Herbivore-species-specific-induced changes in flower traits with contrasting effects on pollinator visitation. *Plant Cell Environ* 42, 1882–1896. <https://doi.org/10.1111/pce.13520>
- Thomson, F.J., Moles, A.T., Auld, T.D., Kingsford, R.T., 2011. Seed dispersal distance is more strongly correlated with plant height than with seed mass: Dispersal distance and seed mass. *Journal of Ecology* 99, 1299–1307. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01867.x>
- Toledo, Mcb., Donatelli, Rj., 2010. Spectral analysis of flowers used by nectar-feeding birds in an urban area in Southeastern Brazil. *Braz. J. Biol.* 70, 729–735. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842010000400005>
- Trivellini, A., Gordillo, B., Rodríguez-Pulido, F.J., Borghesi, E., Ferrante, A., Vernieri, P., Quijada-Morín, N., González-Miret, M.L., Heredia, F.J., 2014. Effect of Salt Stress in the Regulation of Anthocyanins and Color of *Hibiscus* Flowers by Digital Image Analysis. *J. Agric. Food Chem.* 62, 6966–6974. <https://doi.org/10.1021/jf502444u>
- Tsuchimatsu, T., Yoshitake, H., Ito, M., 2014. Herbivore pressure by weevils associated with flower color polymorphism in *Geranium thunbergii* (Geraniaceae). *J Plant Res* 127, 265–273. <https://doi.org/10.1007/s10265-013-0598-7>
- Vermeulen, P.J., Anten, N.P.R., Schieving, F., Werger, M.J.A., During, H.J., 2008. Height convergence in response to neighbour growth: genotypic differences in the stoloniferous plant *Potentilla reptans*. *New Phytologist* 177, 688–697. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02301.x>
- Violle, C., Navas, M.-L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., Garnier, E., 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos* 116, 882–892. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>
- Zhao, C., Wang, X.-Q., Yang, F.-S., 2014. Mechanisms underlying flower color variation in Asian species of *Meconopsis* : A preliminary phylogenetic analysis based on chloroplast DNA and anthocyanin biosynthesis genes: Mechanisms of flower color variation in *Meconopsis*. *Jnl of Sytematics Evolution* 52, 125–133. <https://doi.org/10.1111/jse.12071>

# Structure d'accueil : Le Laboratoire Image, Ville, Environnement

Le projet scientifique du Laboratoire Image, Ville, Environnement dépasse le strict cadre urbain, et se déploie également dans le domaine de l'environnement, ainsi que celui de l'aménagement et de l'urbanisme en y déclinant essentiellement les aspects environnementaux, spatiaux et sociétaux. Il consiste en un approfondissement de la perspective écologique portant sur la dynamique des systèmes socio-environnementaux et la compréhension des mécanismes d'interaction homme / environnement.

Nos objets de recherche sont appréhendés comme des systèmes, dans leur évolution temporelle comme dans leur déploiement spatial. Cela se traduit par une mise en œuvre conjointe des interactions entre les composantes humaine et environnementale dans la construction de la problématique d'étude ; mais cela implique aussi l'utilisation des outils de la systémique, dont les méthodes quantitatives, la modélisation et la visualisation.

Le projet a pour but de fédérer :

- des recherches portant sur l'étude du fonctionnement urbain, duquel émergent différentes problématiques : les mobilités, les risques et vulnérabilités, l'accessibilité et la morphodynamique ;
- des recherches s'intéressant à la dynamique des paysages et qui rassemblent des compétences complémentaires - géomorphologie fluviale, pédologie, biogéographie, micromorphologie des sols et sédiments, archéologie et dont l'objectif est de se servir des dynamiques paysagères du passé pour étudier les usages du sol présents et futurs ;
- des recherches concernant l'analyse des dynamiques des systèmes socio-environnementaux à court et moyen terme par le prisme de l'imagerie : l'observation multi-capteur des modes d'occupation et d'utilisation des sols, de leur caractérisation quantitative, de leur modélisation et de leur représentation ;
- des recherches visant à appréhender l'étude interdisciplinaire des hydrosystèmes dans une perspective opérationnelle ;
- des recherches se consacrant à l'étude de l'énergie, de la pollution de l'air et du climat, dont l'objectif est de consolider les méthodologies d'évaluation des impacts des activités anthropiques sur l'atmosphère développées précédemment et la création de nouveaux outils intégrés permettant de définir des actions efficaces et cohérentes pour la réduction des besoins énergétiques et des impacts de la pollution de l'air.

Le laboratoire est rattaché aux deux instituts nationaux écologie et environnement (INEE) et sciences humaines et sociales (INSHS) du CNRS, ainsi qu'au Réseau Alsace de Laboratoires en Ingénierie et Sciences pour l'Environnement (RÉALISE). Il est engagé dans les masters Géographie Environnementale, Observation de la Terre et Géomatique, et Urbanisme et Aménagement de la Faculté de Géographie et d'Aménagement de Strasbourg, ainsi que dans l'École Doctorale des Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement de l'Université de Strasbourg.

## Rapport analytique

# Impact de la gestion et de l'urbanisation sur les communautés herbacées : approche fonctionnelle



Photo : Espace herbacé de la ville de Strasbourg de type prairie, ©Benjamin Baudon

# Table des matières

<b>TABLE DES FIGURES .....</b>	<b>2</b>
<b>TABLE DES TABLEAUX .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Contexte.....</b>	<b>5</b>
1.1. L'Eurométropole de Strasbourg.....	5
<b>2. Modèles d'études .....</b>	<b>6</b>
2.1. Choix des espaces herbacés.....	6
2.2. Espèces modèles .....	7
<b>3. Paramètres environnementaux.....</b>	<b>7</b>
3.1. Données de gestion.....	7
3.2. Données d'urbanisation .....	8
<b>4. Protocole de terrain.....</b>	<b>9</b>
4.1. Relevés floristiques.....	9
4.2. Choix des espèces et échantillonnage .....	9
4.3. Mesure de la surface foliaire spécifique (SLA) .....	10
4.4. Mesure de la longueur étirée de reproduction.....	10
4.5. Mesure de la taille des fleurs et des inflorescences .....	10
4.6. Mesure de la couleur des fleurs .....	10
<b>5. Méthodes statistiques .....</b>	<b>11</b>
5.1. Moyenne pondérée de la communauté.....	11
5.2. Modèle statistique.....	11
<b>RESULTATS .....</b>	<b>12</b>
<b>1. Formes urbaines .....</b>	<b>12</b>
<b>2. Variation Spécifique .....</b>	<b>14</b>
<b>3. Cas des espèces modèles .....</b>	<b>17</b>
<b>4. Variation communautaire.....</b>	<b>19</b>
<b>DISCUSSION.....</b>	<b>21</b>
<b>1. Approche spécifique .....</b>	<b>21</b>
<b>2. Cas des espèces modèles .....</b>	<b>22</b>
<b>3. Approche communautaire .....</b>	<b>23</b>
<b>4. Limites et perspectives .....</b>	<b>23</b>
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>24</b>
<b>BIBLIOGRAPHIES.....</b>	<b>25</b>

## Table des figures

Figure 1 Carte représentant les emplacements des sites sur l'Eurométropole de Strasbourg avec leurs formes urbaines associées d'après l'analyse des couches d'occupations du sol. ....	7
Figure 2 Représentation graphique des résultats de l'ACP et de l'HCPC réalisés à partir des données d'occupation du sol de Strasbourg .....	14
Figure 3 Influence de la gestion par groupe sur la hauteur reproductive indépendamment de l'espèce et du site ; à partir des tests de Tukey une lettre est associée à chaque groupe, une lettre en commun signifie qu'aucune différence significative n'as été observé, une absence de lettre en commun signifie qu'il y a une différence significative. Les espaces non fauchés (N), fauchés ponctuellement de types coupés (C) ou broyés (B) et fauchés régulièrement sont représentés ici. ....	15
Figure 4 Influence de la surface sur la hauteur reproductive indépendamment de l'espèce et du site .....	16
Figure 5 Influence de la surface sur la SLA indépendamment de l'espèce et du site .....	17
Figure 6: Influence de la gestion et de l'urbanisation sur les traits fonctionnels des espèces modèle de l'étude ; On retrouve en (a) l'influence de l'urbanisation sur la taille de fleur chez <i>Medicago lupulina</i> , en (b) l'influence de l'urbanisation sur la hauteur reproductive <i>Medicago lupulina</i> , en (c) l'influence de la gestion sur la SLA chez <i>Plantago lanceolata</i> et en (d) l'influence de l'urbanisation sur la hauteur reproductive chez <i>Trifolium pratense</i> . à partir des tests de Tukey une lettre est associée à chaque groupe, une lettre en commun signifie qu'aucune différence significative n'as été observé, une absence de lettre en commun signifie qu'il y a une différence significative. Les espaces non fauchés (N), fauchés ponctuellement de types coupés (C) ou broyés (B) et fauchés régulièrement sont représentés pour la gestion ; la zone naturel (N), la zone portuaire et industrielle (ZPI), la zone péri-urbaine (ZPU) et la zone urbaine (ZU) sont représentées ici pour les formes urbaines.....	18
Figure 7: Influence de la gestion et de l'urbanisation sur les traits moyens de communautés pondérés par l'abondance de chaque espèce ; on peut voir en (a) l'influence de la gestion sur la taille de fleur, en (b) l'influence de la gestion sur la hauteur reproductive et en (c) l'influence de l'urbanisation sur la taille de fleur d'après les classes urbaines créée. à partir des tests de Tukey une lettre est associée à chaque groupe, une lettre en commun signifie qu'aucune différence significative n'as été observé, une absence de lettre en commun signifie qu'il y a une différence significative. Les espaces non fauchés (N), fauchés ponctuellement de types coupés (C) ou broyés (B) et fauchés régulièrement sont représentés pour la gestion ; la zone naturel (N), la zone portuaire et industrielle (ZPI), la zone péri-urbaine (ZPU) et la zone urbaine (ZU) sont représentées ici pour les formes urbaines. ....	20

## Table des tableaux

Tableau 1 Nombre de sites par classe de gestion.....	8
Tableau 2 Classes d'occupation du sol présente sur la zone d'étude .....	8

## Introduction

L'humanité verra sa population dépasser les 9 milliards d'habitants dans les quarante prochaines années (United Nation, 2014), et cette augmentation à essentiellement lieu dans les villes. La population urbaine est passée de 220 millions de personnes en 1900 à 2,8 milliards depuis 2008, cette augmentation ne cesse de croître et devrait passer le cap des 5 milliards de personnes au cours des 15 prochaines années (UNFPA, 2007) . L'étendue des zones urbaines grandit plus rapidement que les populations urbaines, amenant des besoins de plus en plus importants de terres pour construire et agrandir les villes ainsi que pour approvisionner la consommation de ces populations qui ne cesse d'augmenter (Elmqvist et al., 2013). Cette modification dans l'utilisation des sols est responsable de l'altération des processus écosystémiques et a des effets négatifs sur la biodiversité. L'un des principaux facteurs de ces effets négatifs est la perte d'habitat et la fragmentation, en particulier pour les espèces locales. Les espaces urbains anciens sont amenés à changer graduellement en réponse à la fragmentation et aux perturbations anthropiques (Ramalho et al., 2014 ; Williams et al., 2005). Concrètement, les espaces de végétations qu'ils soient agricoles ou naturels seront de plus en plus petits et avec des composantes artificielles plus présentes (bâtiments, routes, etc.) et donc soumis aux conditions environnementales propres des milieux urbains. (Sukopp, 2004; Williams et al., 2009). Les espaces de nature urbains sont donc de plus en plus importants d'un point de vue écologique, car représentant une plus grande part des espaces naturels dans des milieux fortement urbanisés. Il est nécessaire de comprendre l'écologie propre à ces milieux urbains et dans quelle mesure les fonctions des écosystèmes s'en trouve perturbées (Anderson et al., 2020).

Ces espaces urbains ont des conditions climatiques spécifiques qui se traduisent par la modification de la plupart des facteurs abiotiques les plus impactant sur la végétation comme la température, le régime de précipitation, la qualité du sol, etc. La plupart du temps, une augmentation au niveau local de la chaleur est observée en milieu urbain par la formation d'îlots de chaleur (Elmqvist et al., 2013; Esperon-Rodriguez et al., 2020; Williams et al., 2015). Les sols sont fortement dégradés, secs, avec trop d'apports en nutriments. Les concentrations de métaux lourds sont également bien plus importantes en milieu urbain que dans les autres types de milieux (Song et al., 2019). La pollution de l'air est plus importante que dans les zones moins urbanisés et ce peu importe la ville, avec des quantités de CO<sub>2</sub> importantes, et des dépôts de polluant azotés qui enrichissent le milieu (Carreiro and Tripler, 2005; Gregg et al., 2003; Grimm et al., 2008; Pataki et al., 2006; Searle et al., 2012). L'étude de ces perturbations est le plus souvent étudiée en utilisant le concept de gradient des milieux ruraux ou forestiers vers les milieux urbains en émettant l'hypothèse que l'organisation de ces variables environnementales s'organise en fonction du changement de l'occupation des sols dans ce contexte d'urbanisation (McKinney, 2002). Les perturbations environnementales des milieux urbains, notamment l'augmentation

de la chaleur et des concentrations de CO<sub>2</sub>, font écho aux perturbations engendrées par le réchauffement climatique au niveau global, avec l'augmentation des températures et des périodes de sécheresse et de pluie plus intense. L'ensemble de ces facteurs va agir comme un filtre (on parle de filtre environnemental) qui va sélectionner les espèces qui ont les caractéristiques nécessaires à la survie, au développement et à la reproduction dans les conditions altérées vis-à-vis d'un milieu naturel que sont les milieux urbains (Williams et al., 2009). Le milieu urbain peut également enrichir la richesse spécifique des villes. Les nouvelles conditions environnementales vont permettre à des espèces performantes non-indigènes de se développer dans ces nouveaux milieux (Appalasamy et al., 2020).

Les changements d'utilisation des sols et de gestion des espaces provoquent des changements dans les communautés végétales qui vont à leur tour modifier la fonctionnalité des écosystèmes (Díaz et al., 2001). Cette modification des espaces peut parfois entraîner une baisse d'abondance des espèces locales au profit d'espèces introduites plus efficaces dans ces milieux nouvellement formés, amenant à la création de nouvelles communautés végétales propres aux milieux urbains (Hahs et al., 2009; Thompson and Jones, 1999)). Les communautés végétales en milieu urbain sont composées en grande partie par des espèces rudérales qui sont des espèces pionnières avec une grande valence écologique leur permettant de s'adapter à une grande variété d'habitats. Ces espèces ont une grande importance dans les espaces urbains, en plus des effets de réduction de la température et de séquestration du carbone induit par la végétation, elles vont fournir un abri pour la faune amener plus de biodiversité en ville (Robinson and Lundholm, 2012). Cette végétation spontanée composée d'espèces indigènes et voyageuses va permettre l'installation d'une communauté variée plus intéressante écologiquement que les gazons semés ou seul une ou plusieurs espèces sont choisis (Guo et al., 2018). Les îlots de végétation spontanée en milieu urbain ont un rôle important dans le maintien de la biodiversité dans ces milieux, cette grande variété d'habitats occupée par ces espèces (zones industrielles abandonnées, ligne de chemin de fer, bords de route, etc.) permet d'abriter une multitude d'espèces végétales, avec une diversité aussi bien spécifique que fonctionnelle (Robinson and Lundholm, 2012).

L'urbanisation entraîne des changements environnementaux responsables de la sélection de plantes aux caractéristiques leur permettant de persister dans leur habitat. La composition des communautés végétales va alors varier le long d'un gradient « urbain-rural », avec des espèces adaptées selon le degré d'artificialisation du milieu (Song et al., 2019). La composition taxonomique d'une communauté est difficilement comparable entre villes de régions biogéographiques différentes en particulier lorsque les régions sont très différentes floristiquement parlant. Dans un contexte de mondialisation et d'urbanisation, il est nécessaire d'évaluer les communautés à un niveau plus général que l'espèce ou la population avec des traits végétaux qui peuvent être facilement mesurés (Díaz et al., 2001). En ne regardant que la taxonomie des communautés, on ne peut pas rendre compte totalement du fonctionnement des écosystèmes, car deux espèces appartenant au même genre peuvent avoir des caractéristiques complètement différentes, c'est pourquoi l'utilisation de traits fonctionnels est particulièrement adaptée à ce type de milieu (Anderson et al., 2020). L'utilisation des traits fonctionnels pour mieux décrire les habitats et déterminer des modèles de réponse de la végétation en fonction de gradient environnementaux est déjà reconnue (McIntyre et al., 1999).

Le stage présenté ici s'effectue dans le cadre du projet EvolVille, qui est porté par le Laboratoire Image Ville Environnement (LIVE) en partenariat avec la Zone Atelier Environnementale Urbaine (ZAEU) et l'Eurométropole de Strasbourg. L'objectif du projet est **d'analyser les variabilités intra et interspécifiques des traits fonctionnels liés à la survie, la croissance et la reproduction des populations végétales de plusieurs espèces selon des variables environnementales propre au milieu urbain**. Le contexte de L'Eurométropole de Strasbourg étant composé de plusieurs centres urbains et entouré de deux forêts intégrées dans le contexte urbain nous amène à considérer l'artificialisation sous un nouveau regard. Pour cela l'artificialisation sera étudiée comme variable environnementale par la définition de formes urbaines, et la définition d'un gradient non plus urbain-rural mais au sein même de la ville qui a déjà une grande variabilité de condition. Cette variété au sein même de la ville se retrouve également dans la gestion, qui varie d'une commune à l'autre, et va entraîner une multitude d'espaces herbacés allant des gazons les plus fauchés aux friches laissés à l'abandon. C'est pourquoi la gestion est un des paramètres retenus dans notre étude.

Dans ce contexte, ce stage a pour objectif d'évaluer la réponse fonctionnelle des plantes de milieu herbacés selon un gradient d'urbanisation et de gestion, que ce soit en évaluant la modification de traits de manière globale ou par la modification de la structure des communautés. L'accent est mis sur les fonctions de gestion des ressources avec la surface foliaire spécifique et la hauteur reproductive, ainsi que la reproduction via cette même hauteur reproductive ainsi que la taille des fleurs et des inflorescences et la couleur. Aux vues de l'apport en azote plus important en milieu urbain, la fonction de gestion des ressources est évaluée en mesurant la surface foliaire spécifique et la hauteur reproductive. Le contexte urbain est également à l'origine d'une baisse des pollinisateurs, altérant la fonction de pollinisation des plantes. Cette altération va être mesurée via la taille des fleurs et des inflorescences, ainsi que la couleur des fleurs. Nos hypothèses sont : Une augmentation de la surface spécifique foliaire et de la hauteur reproductive ainsi qu'une diminution de la taille des fleurs et de l'intensité de couleurs lorsque l'artificialisation du milieu augmente. Une augmentation de la surface spécifique foliaire et une diminution des trois autres traits lorsque la pression de gestion augmente.

## Matériels et méthodes

### 1. Contexte

#### 1.1. L'Eurométropole de Strasbourg

L'Eurométropole de Strasbourg est une communauté urbaine située dans le département du Bas-Rhin créée en 1967 qui regroupe 33 communes dont la ville de Strasbourg. L'Eurométropole accuse une population de plus de 500 000 habitants et est située au bord du Rhin à la frontière de l'Allemagne. La ville de Strasbourg est entourée par les deux forêts rhénanes que sont la forêt de la Robertsau au nord de la ville et la forêt du Neuhof au sud de la ville. L'essentiel des zones

urbanisées se sont construites sur d'anciennes zones agricoles, activité qui est encore très présente dans l'Eurométropole. La stratégie de développement économique de la ville est fortement influencée par son importance au niveau européen, ainsi que son accès au Rhin dont les bords sont essentiellement occupés par des activités économiques et industrielles. La ville est en étroite collaboration avec la ville frontalière de Kehl en Allemagne notamment pour les questions d'aménagements des bords du Rhin. L'urbanisme de Strasbourg est un cas particulier car la ville a été fortement touchée par la seconde guerre mondiale, les bombardements ayant détruit une partie non négligeable de bâtiments remplacés par des parcs et des places.

## 2. Modèles d'études

### 2.1. Choix des espaces herbacés

Pour le projet il a été choisi de mesurer les traits fonctionnels sur 60 espaces herbacés de l'Eurométropole de Strasbourg. Ces espaces ont été repérés dans un premier temps via l'utilisation de couches orthophotographiques de 2017 fournies par l'Eurométropole de Strasbourg avec des tailles de pixels de 20 cm et 5 m. Les espaces herbacés urbains sont des espaces en mutation constante, aussi une prospection est indispensable afin de confirmer l'existence des espaces repérés.

Le choix des espaces s'est effectué selon plusieurs critères. Tout d'abord lors du repérage cartographique les espaces ont été choisis pour être d'une taille minimale de 0,2 ha et situés le long d'un gradient forêt-urbain en excluant volontairement les zones agricoles, ainsi que les milieux fortement ombragés et trop hétérogènes. Les prairies humides ont également été écartées au maximum, dans le but d'avoir un maximum d'espaces aux conditions hygrométriques similaires. 42 sites ont déjà été prospectés en 2020, cet échantillon sera complété cette année pour arriver à 60 sites. Après avoir repéré une trentaine d'espaces complémentaires sur photographie aérienne, ces sites ont été prospectés à vélo afin de vérifier qu'ils correspondent aux critères locaux et paysagers précités. La fréquentation observée, l'accessibilité, le type d'occupation du sol observé, l'intensité apparente de gestion, la complexité de la végétation, le niveau d'embroussaillage, le degré d'hygrométrie du sol et le fond floristique observé (Annexe 1) ont été des critères supplémentaires pour définir les sites retenus pour intégrer l'étude en essayant d'avoir la plus grande diversité de caractéristique, et de recouvrir le mieux possible l'Eurométropole de Strasbourg dans un axe Nord-Sud (Figure 1).

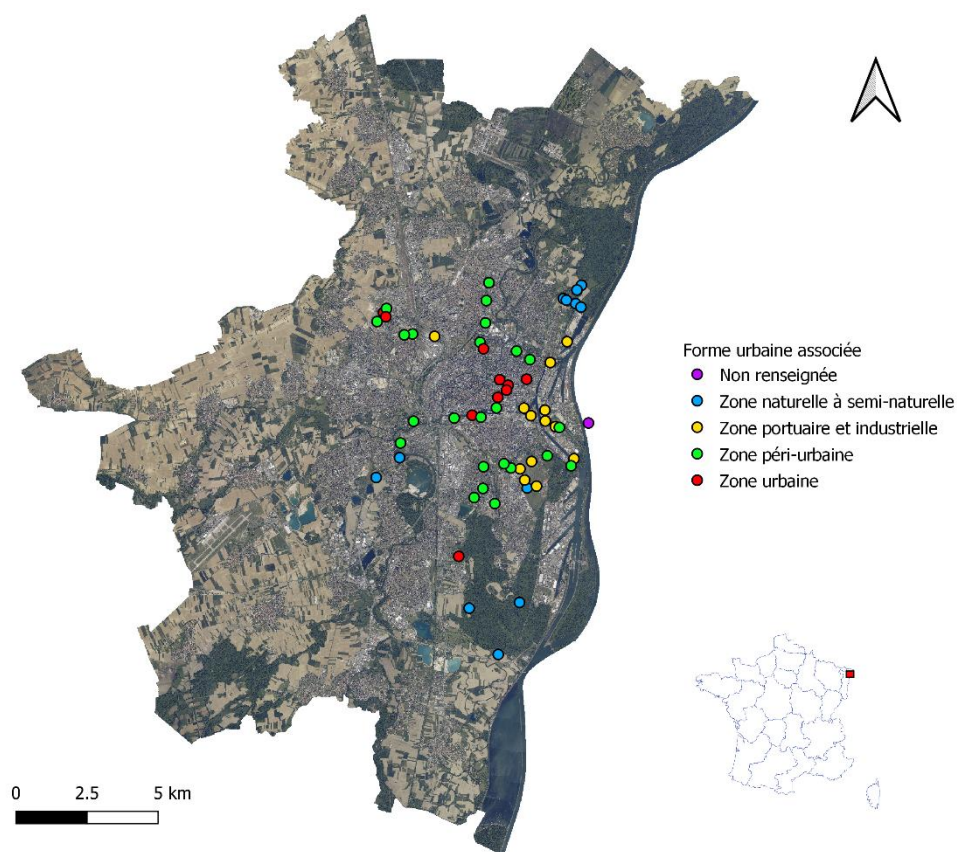


Figure 1 Carte représentant les emplacements des sites sur l'Eurométropole de Strasbourg avec leurs formes urbaines associées d'après l'analyse des couches d'occupations du sol.

## 2.2. Espèces modèles

Parmi toutes les espèces identifiées en 2020 dans le cadre du même projet, 6 espèces ont été sélectionnées comme étant les plus représentées dans les espaces herbacés urbains : *Dactylis glomerata*, *Galium album*, *Medicago lupulina*, *Plantago lanceolata*, *Lotus corniculatus* et *Trifolium pratense*. Ces espèces ont été choisies pour être mis en culture en conditions contrôlées, avec pour objectif d'analyser leurs traits fonctionnels afin de les comparer aux mesures effectuées *in situ*.

## 3. Paramètres environnementaux

### 3.1. Données de gestion

Afin d'étudier l'effet de la gestion sur les espaces herbacés, une des premières étapes de l'étude a été d'identifier les gestionnaires de chacun des 60 sites et d'obtenir des informations sur sa gestion. Pour cela un questionnaire a été réalisé et diffusé par mail à chaque gestionnaire identifié (annexe 2). Ce questionnaire a permis de récolter des informations telles que la fréquence des fauches, le type de fauches, la date des fauches, la présence d'un semi à la création du site,

l'âge du site, etc. À la suite de la récolte de ces données il a été choisi de ne retenir que deux variables pour la création de classe de gestion : la fréquence et le type de fauche. Il existe deux types de fauches sur les sites : La coupe et le broyage. La coupe permet une repousse plus rapide et plus nette de la végétation ainsi que l'export des résidus de fauche, diminuant l'apport en nutriment d'un site et évitant la formation de sols trop riches. Le broyage a pour avantage pour les gestionnaires de diminuer le temps de travail sur les espaces herbacés en laissant le produit de la fauche sur place, il laisse également une hauteur de végétation plus importante que la coupe. La fréquence de fauche peut être divisée en plusieurs catégories : Une absence totale de fauche, une fauche annuelle ou bisannuelle et une fauche plus de deux fois par an. Les fauches annuelles à bisannuelle sont généralement des fauches tardives de type broyée ou coupée tandis que les sites qui ont plus de deux fauches par an ont généralement des fauches qui se déroule tout au long de l'année, et essentiellement par coupe. A partir de ces observations 4 classes de gestion ont été établies (Figure 2).

Tableau 1 Nombre de sites par classe de gestion

Classes de gestion	Nombre de sites
Aucune fauche	7
Fauches ponctuelles coupées	18
Fauches ponctuelles broyées	10
Fauches régulières	19

Les sites retenus ont été cartographiés et leur surface mesurée à partir des couches orthophotographiques avec le logiciel QGIS.

### 3.2. Données d'urbanisation

Pour évaluer l'impact de l'urbanisation sur nos sites des classes urbaines ont été créées à partir de la base de données d'Occupation des sols Grand Est à grande échelle (OCSGE2, réalisé en 2019 par la région Grand Est). Cette base de données fournit des informations sur l'occupation du sol de l'Eurométropole de Strasbourg. A partir de la typologie en 54 typologies, nous avons effectué un regroupement en 11 classes (annexe 3 et tableau 2).

Tableau 2 Classes d'occupation du sol présente sur la zone d'étude

Classes d'occupation du sol	Détail de la classe
Activités économiques	Activités industrielles, commerciales, etc.
Bâti continu	Bâti continu dense ou continu aéré

Équipements et infrastructures collectives	Équipements scolaires et universitaires, équipements hospitaliers, etc.
Espaces en mutation	Espaces en mutation et en transition
Espaces verts urbains	Parcs, gazons, etc.
Infrastructures et superstructures des réseaux de transport	Réseaux routiers, ferrés, espaces aéroportuaires, etc.
Territoires agricoles	Exploitations agricoles, vergers, vignes, etc.
Bâti discontinu	Bâti mixte, bâti individuel, bâti isolé, espaces urbains libres
Espaces herbacés	Friches, espaces enherbés naturels à semi-naturels
Forêt	Formation pré-forestière, forêt de feuillus, peupleraies, etc.
Eau	Cours d'eau, plans d'eau, bassins artificiels, autre zones humides

Le pourcentage de surface occupée par chaque classe d'occupation du sol dans une zone de 200 m autour de chacun de nos sites a été calculé via le logiciel QGIS. La hauteur moyenne des bâtiments au sein de cette même zone tampon a été obtenue à partir de la couche « Strasbourg 3D » de l'Eurométropole de Strasbourg.

## 4. Protocole de terrain

### 4.1. Relevés floristiques

Notre échantillonnage se compose de 15 carrés de 1m<sup>2</sup> par espace herbacé réparti en 3 lignes de 5 x 1m<sup>2</sup> distantes de 4 m entre elles et situées environ au centre du site (ou pour les grands sites, à au moins 20 mètres de la bordure).

Un plan de localisation des carrés ainsi que leur localisation GPS permettront de les replacer au même endroit d'année en année pour réaliser un suivi temporel. Dans chacun des carrés, les espèces présentes sont notées une fois par an (entre juin et juillet) ainsi que leur phénologie (végétatif, fleur ou fruit).

### 4.2. Choix des espèces et échantillonnage

Pour chaque site, les 3 espèces en fleurs les plus fréquentes au sein des 15 carrés sont retenus pour les mesures de traits. En plus de ces espèces dominantes, lorsqu'elles sont présentes, les espèces modèles présentées ci-dessus sont également retenues dans l'échantillon. Le nombre d'espèces étudiées par site varie ainsi de 3 à 9 espèces. Pour chacune d'elles et au sein de chaque site, 5 individus sont mesurés.

L'échantillonnage des individus se fait en s'éloignant de 2 m de chacun des 15 carrés afin de ne pas échantillonner sur les zones de relevés floristiques. Les premiers individus observés sont mesurés afin de limiter l'influence de l'observateur sur le choix des individus étudiés.

#### **4.3. Mesure de la surface foliaire spécifique (SLA)**

La surface foliaire spécifique correspond au rapport de la surface sur le poids sec d'une feuille, elle nécessite donc la mesure de ses deux paramètres. La surface des feuilles a été mesurée directement à l'aide d'un planimètre mesureur laser portable de surface de feuilles (modèle CI-202, CID-BIOSCIENCE). La feuille mesurée est la troisième feuille en partant du bas de l'inflorescence ou de la fleur. Pour la majorité des plantes cela correspond à une feuille en bonne santé, contrairement à celle qu'on retrouve à la base, et assez développée contrairement aux feuilles du haut. Lorsque les individus présentent des feuilles de petites tailles en verticilles (e.g. *Galium album*), il a été choisi de mesurer l'ensemble d'un verticille. L'appareil fait la somme des surfaces des entités présentes aussi il est possible de mesurer plusieurs feuilles d'un individu à condition d'éviter tout chevauchement des feuilles entre elles. Une fois scannée la feuille est conservée dans un filtre à café puis mise dans une étuve durant 48h à 80°C pour être séchée. Une fois sortie de l'étuve la feuille est pesée sur une balance avec une précision à 0,0001g.

La SLA est mesurée en transcrivant les valeurs de surface en m<sup>2</sup> et les valeurs de pesées en kg afin d'obtenir une valeur en m<sup>2</sup>/kg.

#### **4.4. Mesure de la longueur étirée de reproduction**

La longueur maximale étirée de chaque individu entre son point d'attache principal et ses derniers tissus reproducteurs (fleurs) est mesurée au mm près directement sur le terrain.

#### **4.5. Mesure de la taille des fleurs et des inflorescences**

Pour chaque individu, la plus grande dimension (longueur ou diamètre) de la fleur ou de l'inflorescence est mesurée. Le choix de mesurer la longueur de la fleur ou le diamètre est établi à l'avance (Annexe 4). Il faut choisir une fleur/inflorescence qui a ses étamines encore à l'anthèse (colorées et aux tissus turgescents).

#### **4.6. Mesure de la couleur des fleurs**

Une fois mesurées, les fleurs et inflorescences des herbacées non graminéennes sont récupérées dans des pochettes plastiques notées des initiales de l'espèce, du numéro de la prairie et du numéro de l'individu. De retour au laboratoire, les fleurs sont scannées à l'aide d'une imprimante au format TIFF et avec une résolution de 600dpi afin de conserver le maximum de pixels de l'image. La couleur est ensuite mesurée sur les images obtenues à l'aide de la fonction RGBmeasure du logiciel ImageJ. Trois répliquats sont effectués soit 3 pétales mesurés pour une fleur ou 3 fleurs mesurées

pour une inflorescence afin d'obtenir pour chaque individu une valeur moyenne de rouge, de vert et de bleu. Ces valeurs correspondent au système de couleurs RVB, et permettent de comparer des intensités lumineuses dans ces trois couleurs dans le cadre de notre étude.

## 5. Méthodes statistiques

L'ensemble des tests statistiques a été fait en utilisant le logiciel R via Rstudio. La hauteur reproductrice, les trois paramètres de la couleur, la taille des fleurs et la surface ont été normalisés via la fonction logarithme. Les valeurs de SLA ont été additionnées de un avant d'être normalisées via la fonction logarithme.

### 5.1. Moyenne pondérée de la communauté

Pour chacun des traits, la moyenne pondérée par la fréquence des espèces au sein d'un site (CWM pour community weighed mean) est calculée en utilisant la fonction **weighted.mean**.

### 5.2. Modèle statistique

L'impact des variables environnementales sur les traits mesurés a été mesuré à l'aide d'un modèle linéaire généralisé mixte (GLMM pour Generalized Linear Mixed Model) à l'échelle de l'espèce et de la communauté. L'échelle spécifique permet de voir les effets de nos variables sur les valeurs de traits pour tout individus indépendamment de son espèce et du site sur lequel il a été prélevé. En ne tenant compte que des données d'une espèce, cela permet d'observer l'effet sur les espèces modèles. L'échelle communautaire est obtenue à partir des moyennes pondérées de communauté, et permet de évaluer un effet par site, rendant compte de la structure des communautés. Les traits mesurés sont les variables réponses tandis que la forme urbaine associée, le type de gestion ainsi que la surface sont les variables explicatives.

#### 5.2.1. Création de formes urbaines

Les pourcentages de chaque classe d'occupation et la hauteur moyenne des bâtiments pour chaque site ont été utilisées pour créer des groupes de site qui correspondent aux différentes formes urbaines de la ville de Strasbourg. Pour cela une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée suivie d'une classification hiérarchique sur composantes principales (HCPC). Ces analyses permettent d'évaluer la distance entre nos sites d'après leurs classes d'occupations ainsi que leurs hauteurs puis de regrouper les sites similaires. Ces analyses ont été réalisées en utilisant les fonctions **ACP** et **HCPC** du package **FactoMineR**.

### 5.2.2. Echelle spécifique

Un effet aléatoire a été mis sur les variables « espèces » et « site » pour permettre de prendre en compte les changements fonctionnels indépendamment du site et de l'espèce. L'effet mesuré est alors uniquement l'effet des variables explicatives sur les traits. Pour calculer ce modèle la fonction **lmer** du package **lme4** a été utilisée.

### 5.2.3. Echelle de l'espèce modèle

Un modèle proche n'ayant un effet aléatoire que sur le site a été utilisé pour observer les différences de traits dues à nos variables environnementales pour nos espèces modèles une à une.

### 5.2.4. Echelle communauté

Un modèle linéaire simple a été créé pour évaluer l'effet de nos variables sur les CWM de nos sites. Les variables réponses sont chacun de nos traits, et la forme urbaine associée, la classe de gestion et la surface sont nos variables explicatives. Ce test permet d'évaluer l'impact de la gestion et de l'urbanisation sur les communautés végétales.

Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour chacun des modèles créés afin d'établir si les différences observées au sein de nos variables réponses étaient significativement liées à nos variables explicatives.

Enfin lorsqu'une différence significative d'un trait due à un paramètre environnemental de type catégoriel était observée, un test de comparaison multiple de Tukey a été réalisé à l'aide de la fonction **glht** du package **multcomp** pour détailler les différences entre chaque groupe d'une variable catégorielle.

## Résultats

Les données de gestion et d'urbanisation ont pu être récoltées sur 53 sites sur l'ensemble de l'Eurométropole de Strasbourg (Annexe 5). Sur ces sites, la SLA, la longueur étirée de reproduction ainsi que la taille des fleurs et inflorescences a été mesurées sur 1300 individus appartenant à 54 espèces différentes (Annexe 6). Sur un sous-échantillon de 39 sites, la couleur des fleurs a été analysée sur 775 individus de 31 espèces. Nous n'avons pas pu mettre en évidence statistiquement d'effet de la gestion et de l'urbanisation sur la couleur des fleurs. Les résultats des ANOVA réalisées pour chacun des tests réalisés sont disponibles en annexe (Annexe 7 et 8).

## 1. Formes urbaines

À la suite de la réalisation de l'ACP, deux axes ont été conservés expliquant 37.7% de la variance (figure 2). L'axe 1 (22%) décrit un gradient d'artificialisation avec d'un côté des paysages autour des sites constitués en majeure partie de territoires agricoles, forestiers et herbacés et, de l'autre côté, formés majoritairement d'équipements collectifs, de

bâtiments hauts et de logements continus et discontinus. L'axe 2 (15,7%) décrit un gradient de gestion avec d'un côté des espaces non fauchés et de l'autre des espaces fauchés régulièrement. Le détail de la contribution de chaque variable aux axes peut être retrouvé en annexe (Annexe 9).

L'HCPC a permis de construire 4 groupes qui sont également présentés sur la figure 2. Le premier groupe a été interprété comme les espaces naturels à semi-naturels, il regroupe des sites qui sont entourés principalement de forêt avec peu de bâti discontinu.

Le deuxième groupe a été interprété comme les espaces urbains étalés regroupant les activités économiques et industrielles portuaires. Le paysage des sites est composé majoritairement d'infrastructure de transport et d'eau, avec peu de bâti dense.

Le troisième groupe a été interprété comme les espaces péri-urbains étalés d'habitations. Il regroupe les sites entourés de bâti discontinu avec peu de bâti continu.

Le quatrième groupe a été interprété comme les espaces urbains denses à usages mixtes. Ce contexte paysager est principalement composé de bâti dense et d'équipements collectifs, avec peu de surface d'eau.

L'ensemble des relations entre groupe et variables paysagères est significatif et peut être retrouvé en annexe (Annexe 10). Les deux tests ont permis d'interpréter les axes comme tel : L'axe 1 est appelé artificialisation allant du moins artificialisé avec le groupe d'espaces naturel à semi-naturels, au plus artificialisés avec les espaces urbains denses. L'axe 2 est appelé densification, allant du moins dense avec les espaces portuaires et industriels au plus dense avec les zones urbaines.

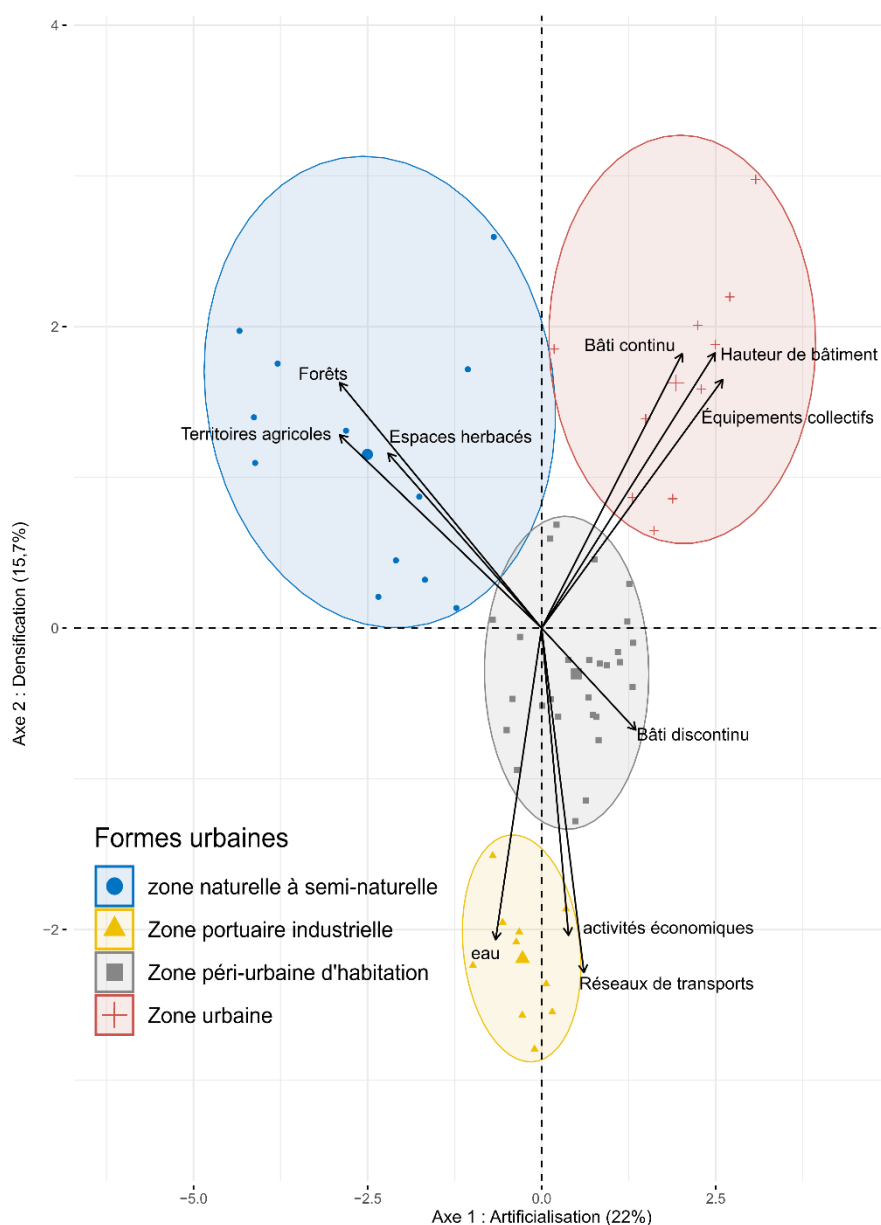


Figure 2 Représentation graphique des résultats de l'ACP et de l'HCPC réalisés à partir des données d'occupation du sol de Strasbourg

## 2. Variation Spécifique

Pour l'ensemble des modèles réalisés à l'échelle spécifique, la normalité et l'homogénéité des variances des résidus n'ont pas été validées. Cependant la taille importante de notre échantillon et l'analyse visuelle des distributions des résidus et de leur variance nous ont amené à décider de conserver les modèles paramétriques. Il sera néanmoins important de vérifier la validité de nos résultats ultérieurement à l'aide de modèles non paramétriques. Les résultats ont pu être obtenus en créant un modèle linéaire généralisé à effets mixtes, avec un effet aléatoire sur le site et l'espèces. Pour l'ensemble des graphiques les valeurs prédites par le modèle statistiques sont utilisées pour tenir compte de ses effets.

La hauteur reproductive est influencée par la gestion ( $F = 4,38$ ,  $p = 0,0087$ ) (figure 3), elle est plus faible dans les espaces fauchés régulièrement que dans les espaces non fauchés et est variable dans les prairies fauchées 1 à 2 fois par an.

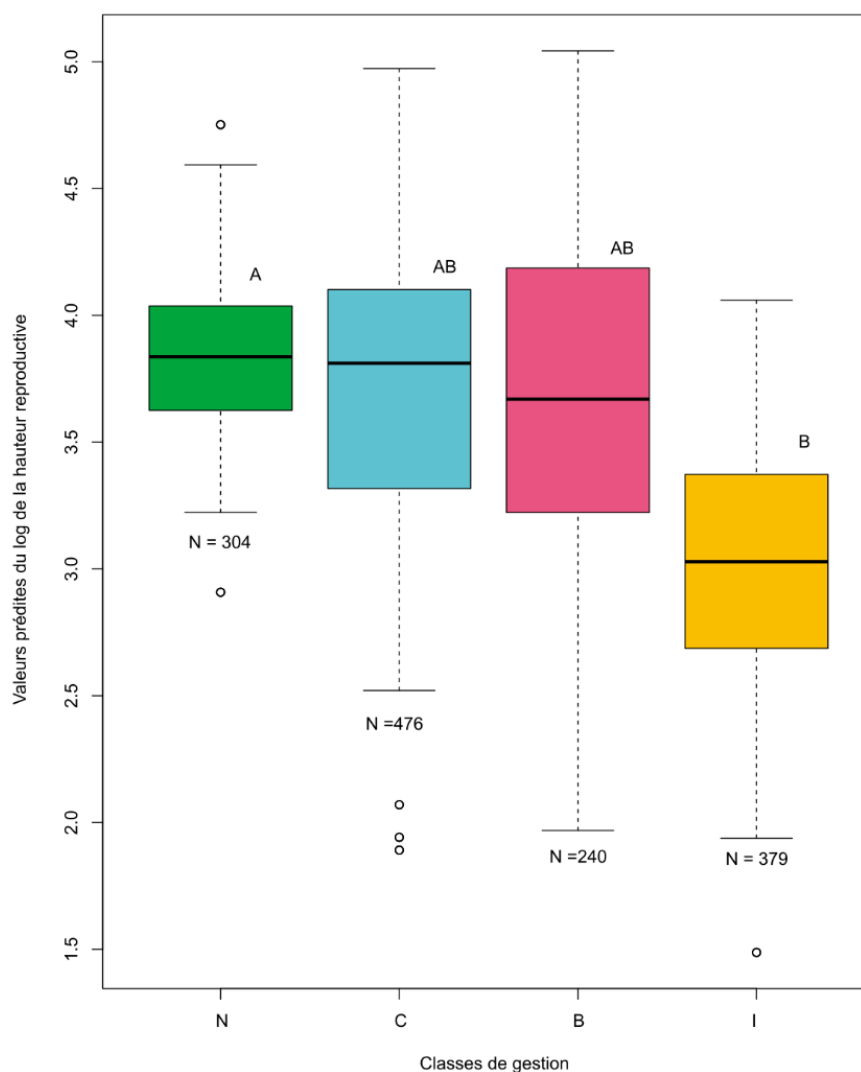


Figure 3 Influence de la gestion par groupe sur la hauteur reproductive indépendamment de l'espèce et du site ; à partir des tests de Tukey une lettre est associée à chaque groupe, une lettre en commun signifie qu'aucune différence significative n'a été observé, une absence de lettre en commun signifie qu'il y a une différence significative. Les espaces non fauchés (N), fauchés ponctuellement de types coupés (C) ou broyés (B) et fauchés régulièrement sont représentés ici.

La hauteur reproductrice est également corrélée positivement à la surface des sites ( $F = 5,90$ ,  $p = 0,031$ ) (figure 4).

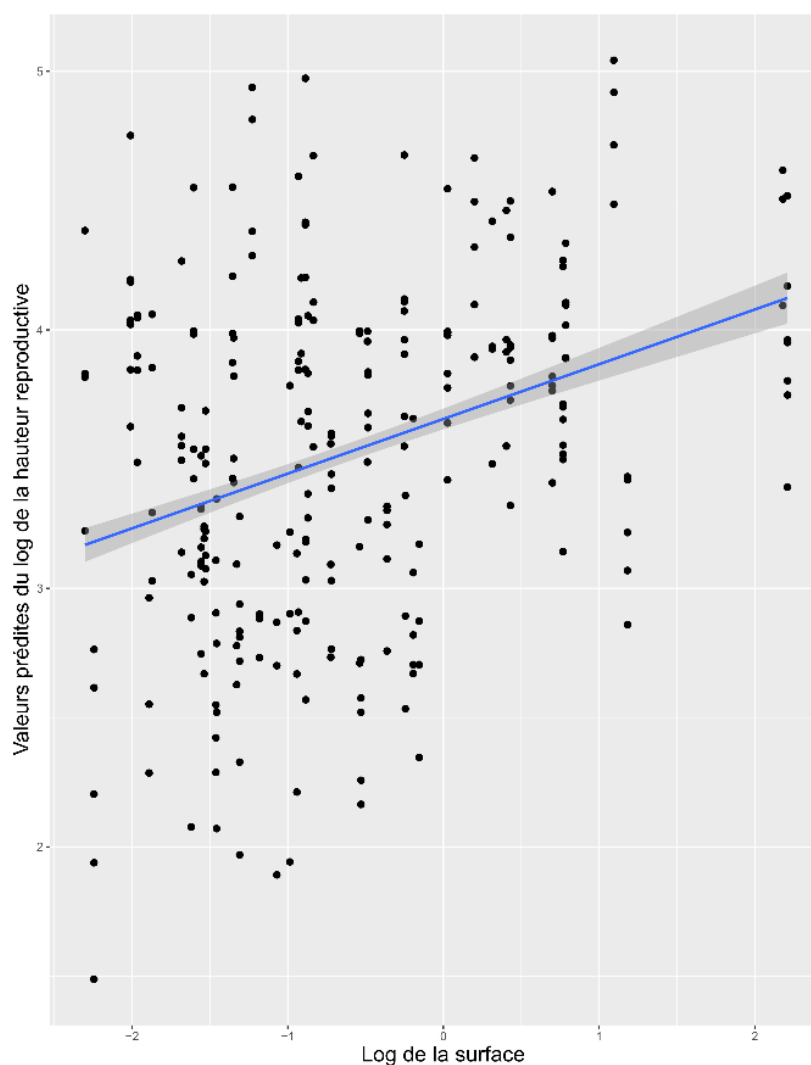


Figure 4 Influence de la surface sur la hauteur reproductrice indépendamment de l'espèce et du site

Il y'a une corrélation négative de la SLA en fonction de la surface ( $F = 4,67$ ,  $p = 0,036$ ) (figure 5).

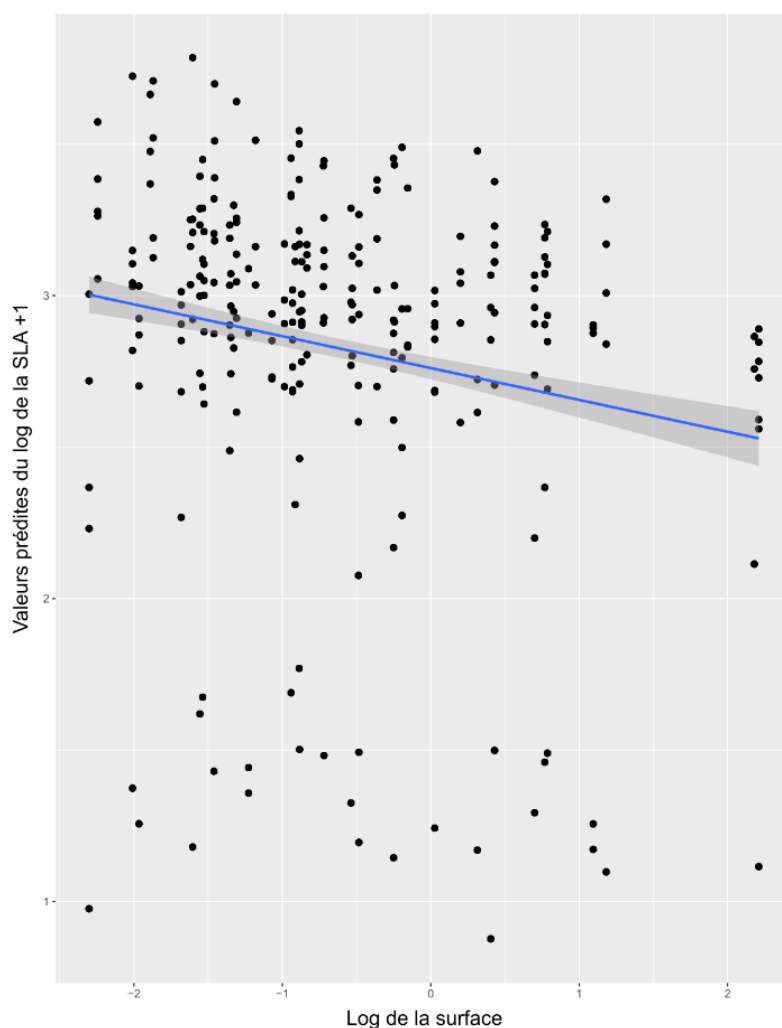


Figure 5 Influence de la surface sur la SLA indépendamment de l'espèce et du site

### 3. Cas des espèces modèles

Pour l'ensemble des modèles réalisés à l'échelle spécifique, la normalité et l'homogénéité des variances des résidus a été validée. Pour l'ensemble des graphiques les valeurs prédites par le modèle statistiques sont utilisées pour tenir compte de ses effets. La taille des inflorescences de *Medicago lupulina* est plus importante dans les espaces urbains et péri-urbains que dans les espaces naturels ( $F = 4.08$ ,  $p = 0.038$ ) (Figure 7 (a)). Il y a également un effet significatif de la forme urbaine sur la hauteur reproductive chez cette espèce ( $F = 3.04$ ,  $p = 0.049$ ) (Figure 7 (b)). La hauteur est plus importante significativement dans les espaces péri-urbains que dans les espaces portuaires industriels.

( $F = 3.13$ ,  $p = 0.038$ ) (Figure 7 (c)). La SLA est significativement plus petite pour *Plantago lanceolata* dans les espaces non fauchés que dans les espaces coupés ponctuellement ou régulièrement.

( $F = 4.99$ ,  $p = 0.015$ ) (Figure 7 (d)). *Trifolium pratense* est plus petit dans les espaces urbains que dans les espaces péri-urbains.

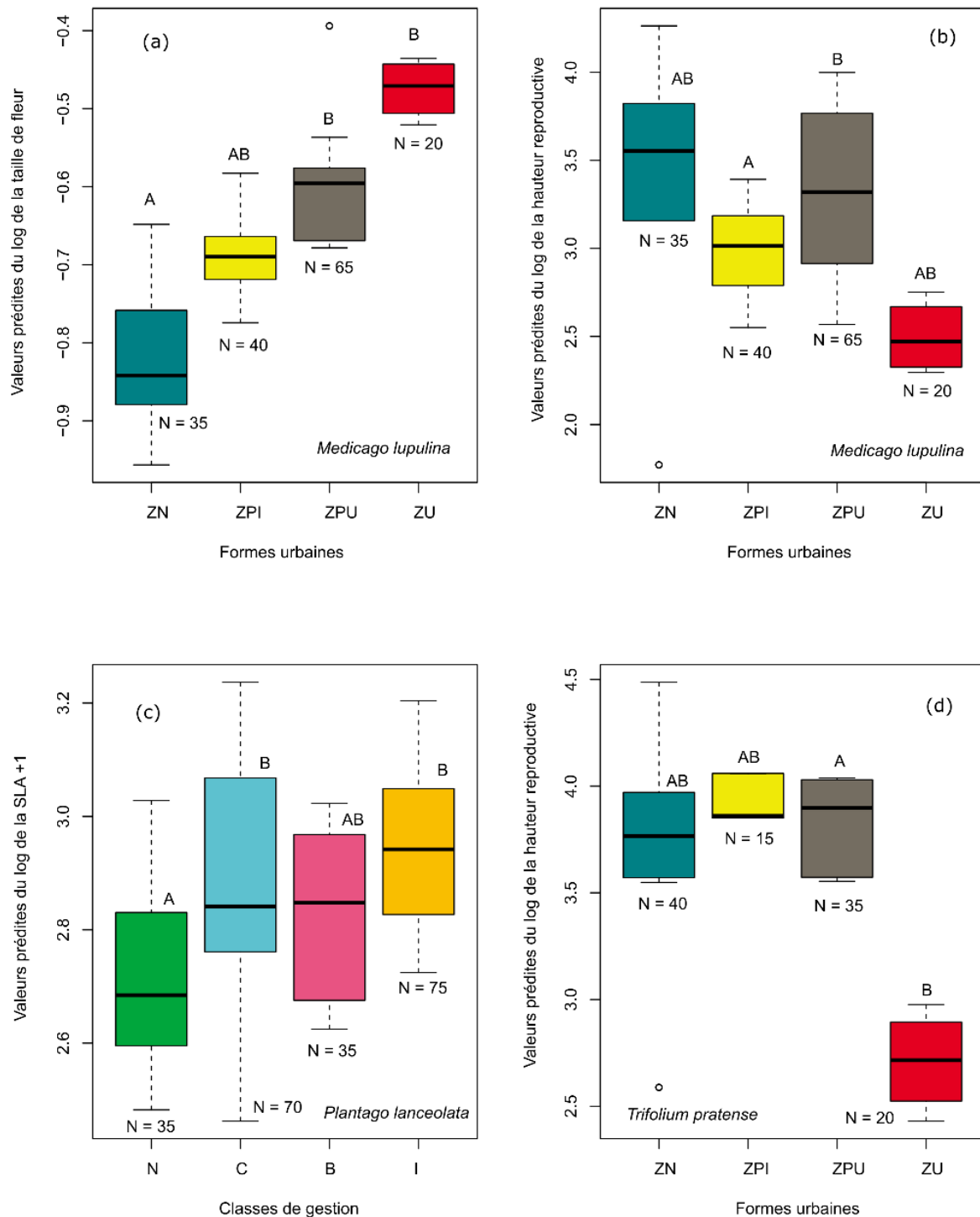


Figure 6: Influence de la gestion et de l'urbanisation sur les traits fonctionnels des espèces modèle de l'étude ; On retrouve en (a) l'influence de l'urbanisation sur la taille de fleur chez *Medicago lupulina*, en (b) l'influence de l'urbanisation sur la hauteur reproductive *Medicago lupulina*, en (c) l'influence de la gestion sur la SLA chez *Plantago lanceolata* et en (d) l'influence de l'urbanisation sur la hauteur reproductive chez *Trifolium pratense*. à partir des tests de Tukey une lettre est associée à chaque groupe, une lettre en commun signifie qu'aucune différence significative n'as

été observé, une absence de lettre en commun signifie qu'il y a une différence significative. Les espaces non fauchés (N), fauchés ponctuellement de types coupés (C) ou broyés (B) et fauchés régulièrement sont représentés pour la gestion ; la zone naturel (N), la zone portuaire et industrielle (ZPI), la zone péri-urbaine (ZPU) et la zone urbaine (ZU) sont représentées ici pour les formes urbaines

#### 4. Variation communautaire

Pour l'ensemble des modèles réalisés à l'échelle spécifique, la normalité et l'homogénéité des variances des résidus a été validée. Pour l'ensemble des graphiques les valeurs prédites par le modèle statistiques sont utilisées pour tenir compte de ses effets. La taille des fleurs est peu variable et plus faible dans les espaces coupés régulièrement ou ponctuellement que dans les espaces non fauchés et broyés ponctuellement ( $F = 4.91$ ,  $p = 0.0049$ ) (Figure 6 (a)). La hauteur reproductive semble également être affectée par la classe de fauche ( $F = 7.98$ ,  $p = 0.00023$ ) (Figure 6 (b)). Le test de Tukey montre que la hauteur reproductive est significativement plus grande dans les espaces non fauchés et fauchés ponctuellement par broyage que dans les espaces fauchés régulièrement. Enfin, il y a un effet significatif de la forme urbaine sur la taille des fleurs ( $F = 6.05$ ,  $p = 0.002$ ) (Figure 6 (c)). La proximité d'espaces portuaires et industriels est liée à des tailles de fleurs plus petites significativement que pour les autres espaces urbains.

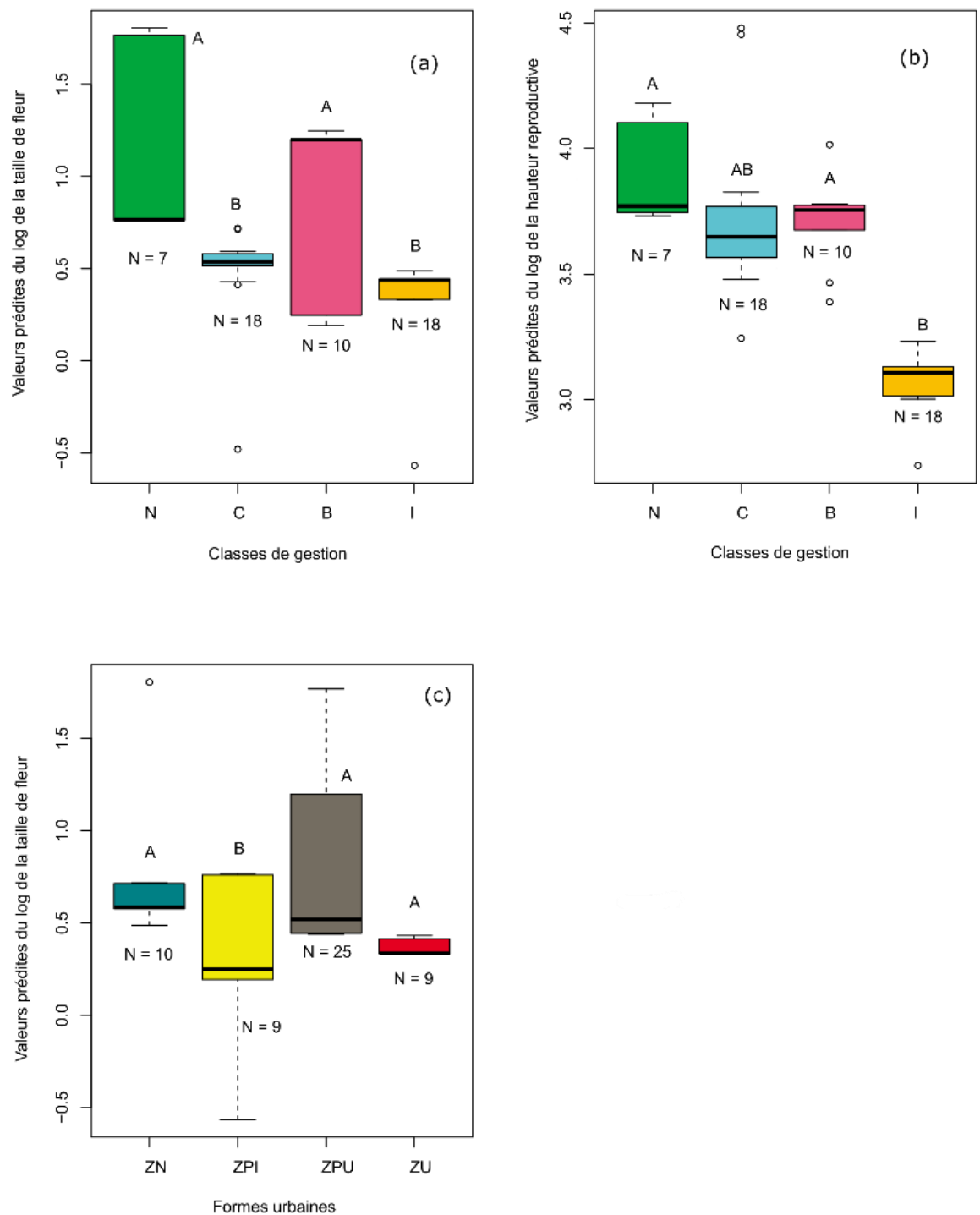


Figure 7: Influence de la gestion et de l'urbanisation sur les traits moyens de communautés pondérés par l'abondance de chaque espèce ; on peut voir en (a) l'influence de la gestion sur la taille de fleur, en (b) l'influence de la gestion sur la hauteur reproductive et en (c) l'influence de l'urbanisation sur la taille de fleur d'après les classes urbaines créée. à partir des tests de Tukey une lettre est associée à chaque groupe, une lettre en commun signifie qu'aucune différence significative n'a été observé, une absence de lettre en commun signifie qu'il y a une différence significative. Les

espaces non fauchés (N), fauchés ponctuellement de types coupés (C) ou broyés (B) et fauchés régulièrement sont représentés pour la gestion ; la zone naturel (N), la zone portuaire et industrielle (ZPI), la zone péri-urbaine (ZPU) et la zone urbaine (ZU) sont représentées ici pour les formes urbaines.

## Discussion

### 1. Approche spécifique

Au niveau spécifique, le type de gestion semble affecter la hauteur reproductive, ce qui correspond avec notre hypothèse de départ. La différence entre les espaces non fauchés et les espaces les plus fortement gérés semble montrer qu'une gestion forte a un effet négatif sur la hauteur reproductive, et ce, toutes espèces confondues. Pour le même stade phénologique – à savoir adulte en fleur – les individus mesurés dans les friches (fauche moins d'une fois par an) sont sensiblement plus grands que les individus présents dans les gazons (fauche plus de 2 fois par an). Dans la mesure où les individus sont échantillonnés adultes et en fleur, il semblerait qu'une gestion forte favorise au sein des populations des individus de plus petite taille. Cela pourrait être expliqué par une diminution de la compétition des espèces pour la lumière dans les gazons (Vermeulen et al., 2008), cela pourrait également signifier un avancement de la phénologie lorsque les milieux sont fortement gérés, avec un besoin de se reproduire au plus vite au vu de la coupe régulière. La sélection d'individus de plus petite taille peut signifier qu'une gestion forte limite la consommation de ressources nécessaires à l'établissement d'une tige de grande taille, qui constitue un coût d'entretien important (Falster and Westoby, 2003). La gestion étant régulière, les plantes allouent moins de temps au développement de leurs tiges et potentiellement plus à l'avancement de leurs phénologies. Aucun effet des formes urbaines n'a été identifié sur la hauteur reproductive ce qui nous permet de poser l'hypothèse que l'augmentation de la hauteur avec la richesse des sols et la température (Mao et al., 2020) est contrebalancée par d'autres facteurs environnementaux.

La hauteur reproductive est également corrélée positivement à la surface du site. Cela pourrait s'expliquer par la diminution des perturbations de manière générale comme la fréquentation ou la zone de contact avec les autres habitats. La SLA, quant à elle, est corrélée négativement à la surface. Lorsqu'une la taille d'un site, augmente, l'effet de l'ombre diminue par la diminution de surface de contact avec les autres habitats tels que les forêts, ou dans notre cas avec les bâtiments de grande taille. La SLA étant corrélée négativement à l'intensité lumineuse (Pierce et al., 1994), on peut penser que la quantité de lumière reçue est plus importante dans les prairies de grandes tailles, en particulier dans des milieux où la fauche diminue la compétition pour la lumière des espèces de l'habitat.

Au niveau fonctionnel, la réduction de la taille des individus va avoir un impact négatif sur la dispersion de ses graines, et sa pollinisation (Garnier and Navas, 2013). Une baisse de la hauteur reproductive veut également dire une baisse du diamètre de la tige qui lui est corrélé positivement (Niklas, 2007) et une baisse de la surface moyenne transversale des

racines (Hummel et al., 2007). Les plantes des espaces fortement gérés sont donc moins performantes dans l'acquisition et dans l'utilisation des ressources, car elles ont une tige peu développée ainsi que des racines peu épaisses et peu profondes. Avoir des racines moins profondes pourrait sensibiliser les espèces en cas de sécheresse, car plus les racines sont profondes plus la capacité des plantes à exploiter la ressource en eau est élevée (Schenk and Jackson, 2002).

## 2. Cas des espèces modèles

Parmi nos espèces modèle, *Medicago lupulina* a montré une corrélation positive de la taille de ses inflorescences avec l'artificialisation. Les espaces urbains et péri-urbain présentent des inflorescences de plus grandes tailles que les espaces naturels, ce qui contredit notre hypothèse de départ selon laquelle la baisse de la diversité et de l'abondance des pollinisateurs en ville aurait un impact négatif sur la fonction de pollinisation des espèces (Kuriya et al., 2015) entraînant une diminution de la taille des fleurs. Cependant, d'autres études montrent une augmentation de l'interaction plantes-pollinisateurs corrélée notamment avec une augmentation du nombre de fleurs (Desaegher et al., 2017). Une plus grande taille de fleurs pourrait s'expliquer du fait de la richesse du milieu, qui peut être un facteur limitant dans le développement des fleurs (Galen, 1999). Les communautés de pollinisateurs sont plus diversifiées lorsqu'on augmente la quantité d'espaces verts urbains (Wenzel et al., 2020), et une augmentation de la taille de ses fleurs pourrait permettre à un plus grand nombre d'espèces de venir les polliniser d'autant plus que cette espèce est entomogame et nectarifère. La zone péri-urbaine est celle où l'on retrouve la majorité de nos sites, si elle ne possède pas de grandes surfaces d'espaces herbacées, elle en possède un grand nombre ce qui est positif pour la diversité des pollinisateurs. Une différence significative de hauteur reproductive a également été observée chez cette espèce, la hauteur des individus est plus importante en milieu péri-urbain qu'en milieu portuaire et industriel. Les zones industrielles semblent présenter des perturbations plus importantes et des milieux plus secs que les zones péri-urbaines ce qui pourrait limiter la pousse des individus. Cela pourrait également témoigner d'une augmentation de la compétitivité pour la lumière dans les milieux péri-urbains ainsi que d'un plus grand accès aux ressources. Ces résultats que l'on ne retrouve pas au niveau spécifique global pourraient indiquer une grande variabilité des individus de *Medicago lupulina* à l'urbanisation.

Chez le plantain lancéolé (*Plantago lanceolata*), la SLA augmente significativement avec la pression de gestion. Cela est en accord avec notre hypothèse de départ, car la SLA augmente lorsque le milieu est fortement perturbé en particulier dû à l'augmentation de la teneur en azote dans le sol (Williams et al., 2015). Cela pourrait indiquer une certaine variabilité du plantain qui peut augmenter son absorption des ressources lors d'une perturbation de types fauches. La fauche par broyage laissant les exports sur place, elle augmente la richesse du milieu, mais cela semble négligeable à l'échelle du plantain. Le plantain est une espèce qui a des feuilles basales disposées en rosette, ce qui augmente la possibilité d'être à l'ombre, sachant qu'une baisse de l'intensité lumineuse entraîne une baisse de la SLA. Enfin, la SLA augmente avec la durée de vie de la plante, et permet une résistance à l'herbivorie (Agrawal et al., 2006). La fauche peut alors être considérée comme une perturbation du même type que l'herbivorie, privilégiant des SLA plus élevées.

La hauteur reproductive de *Trifolium pratense* est fortement corrélé négativement lorsqu'on passe d'un milieu péri-urbain à un milieu urbain. Les trèfles pourraient être particulièrement sensibles à une forte artificialisation. On sait que le trèfle des prés est une espèce nectarifère et entomogame, aussi une diminution de sa taille pourrait être une réponse à une diminution de l'activité de pollinisateur due à l'urbanisation intense. Elle peut également traduire une baisse des capacités de gestion des ressources comme expliqué dans la partie précédente, ce qui voudrait dire que les zones urbaines denses ont des ressources plus limitées ou plus difficile à acquérir. Cela est également lié à la gestion, car la majorité des sites de milieu fortement urbanisé sont des espaces fortement gérés, ce qui peut contrebalancer ou accentuer les effets de l'artificialisation.

### 3. Approche communautaire

Au niveau communautaire, une fauche de types coupée qu'elle soit ponctuelle ou fréquente semble induire une plus faible taille de fleur que des milieux non fauchés ou broyés. La pression de coupe entraîne un changement dans la composition des sites en privilégiant les espèces qui ont des fleurs de plus petite taille, plus facile à entretenir du point de vue des ressources. Les résultats suivent ceux cités aux niveaux spécifiques, la baisse de la hauteur dans les milieux industriels par rapport aux autres types de milieux rejoint les observations faites chez *Medicago lupulina*, ces milieux fortement dégradés et plus sec semble favoriser les espèces avec des fleurs de petite taille. La hauteur reproductive est moins importante dans les espaces fortement gérés ce qui rejoint les observations faites précédemment. Cependant, l'observation de cet effet au niveau communautaire indique une différence de composition spécifique des communautés privilégiant les espèces de plus petite taille. La gestion entraîne donc des effets à la fois spécifique et communautaire sur la hauteur reproductive. Ceci entraîne les mêmes conséquences, soit une plus grande difficulté de reproduction et de gestion des ressources pour les espèces de plus petite taille, les rendant plus sensibles aux changements brutaux et à l'introduction d'espèces très compétitive. La baisse de la taille des fleurs dans les milieux industriels par rapport aux autres types de milieux ne rejoint pas les observations faites chez *Medicago lupulina*, ces milieux fortement dégradés et plus sec semble favoriser les espèces de petite taille.

### 4. Limites et perspectives

Les résultats de cette étude n'ont montré aucun effet de l'urbanisation et de la gestion sur la couleur des fleurs, ce qui pourrait être expliqué par le protocole de mesure de la couleur. En effet, la prise en compte des valeurs RVB ne permet d'évaluer qu'une infime partie du spectre de réflectance des fleurs, qui s'étend même dans l'ultraviolet (Chittka and Menzel, 1992). L'utilisation d'un spectrophotomètre à fibre optique et/ou d'une caméra ultraviolette permettrait de mesurer plus précisément les variations de couleurs chez les plantes et leurs liens avec la pollinisation.

La création de forme urbaine réalisée ici est limitée par la quantité de données que nous avons, et ne peut rendre compte totalement de la réalité du terrain, ainsi que de la complexité du milieu urbain. La mesure sur le terrain de l'occupation du sol autour de chacun de notre site pourrait nous communiquer des informations plus fines du contexte paysager des

sites étudiés. L'intégration de données comme l'histoire des espaces, leurs fréquentations, leurs usages, etc. est indispensable à la création de formes urbaines permettant d'appréhender complètement l'effet de l'urbanisation sur les écosystèmes.

La prise en compte de variables environnementales tels que la composition des sols est prévue à l'avenir et pourrait permettre une meilleure compréhension de la composition en espèces des sites. Enfin, les variables environnementales peuvent avoir des effets croisés, par exemple, la totalité des sites d'une surface de plus de 1 ha sont fauchés ponctuellement par coupe, tandis que la majorité des espaces urbains denses ont une gestion forte. Ces interactions pourraient diminuer la compréhension globale des relations entre fonctionnalités et urbanisation.

## 5. Conclusion

Cette étude a permis de montrer un effet de l'urbanisation et de la gestion sur la taille des plantes et la structure des communautés. La grande variété d'habitats possible semble conduire à une plus grande diversité fonctionnelle que ce soit au sein des espèces ou des communautés. Les effets à l'échelle des espèces modèles ont montré des résultats qui ne transparaissent pas toujours à d'autres échelles ce qui signifie que la variabilité des individus peut montrer des relations qui ne sont pas visibles à une échelle plus grande. L'objectif à l'avenir est de définir la part de plasticité phénotypique et d'adaptation génétique dans cette variabilité, ce qui nous communiquera des informations générales sur la capacité d'adaptation des plantes aux milieux urbains. La diminution de la taille des plantes a été observée au niveau communautaire et spécifique en relation avec les pressions environnementales. La diminution des pressions de fauches pourrait augmenter la performance fonctionnelle des individus pour ce qui est de la nutrition, la gestion de la ressource en eau et la reproduction. Les milieux moins fauchés, en particulier lorsqu'aucune fauche n'est mise en place, sont plus résistants face à l'introduction d'espèces fortement compétitives et aux variations environnementales du milieu telles que la sécheresse ou l'herbivorie. La multiplication des types d'habitats différents, même de petite taille, permettrait d'améliorer la diversité fonctionnelle des individus.

## Bibliographies

- Anderson, P., Charles-Dominique, T., Ernstson, H., Andersson, E., Goodness, J., Elmqvist, T., 2020. Post-apartheid ecologies in the City of Cape Town: An examination of plant functional traits in relation to urban gradients. *Landsc. Urban Plan.* 193, 103662. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103662>
- Carreiro, M.M., Tripler, C.E., 2005. Forest Remnants Along Urban-Rural Gradients: Examining Their Potential for Global Change Research. *Ecosystems* 8, 568–582. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0172-6>
- Chittka, L., Menzel, R., 1992. The evolutionary adaptation of flower colours and the insect pollinators' colour vision. *J. Comp. Physiol. A* 171. <https://doi.org/10.1007/BF00188925>
- Desaegher, J., Nadot, S., Dajoz, I., Colas, B., 2017. Buzz in Paris: flower production and plant–pollinator interactions in plants from contrasted urban and rural origins. *Genetica* 145, 513–523. <https://doi.org/10.1007/s10709-017-9993-7>
- Díaz, S., Noy-Meir, I., Cabido, M., 2001. Can grazing response of herbaceous plants be predicted from simple vegetative traits?: *Grazing response and vegetative plant traits*. *J. Appl. Ecol.* 38, 497–508. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2001.00635.x>
- Elmqvist, T., Fragkias, M., Goodness, J., Güneralp, B., Marcotullio, P.J., McDonald, R.I., Parnell, S., Schewenius, M., Sendstad, M., Seto, K.C., Wilkinson, C. (Eds.), 2013a. *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1>
- Elmqvist, T., Fragkias, M., Goodness, J., Güneralp, B., Marcotullio, P.J., McDonald, R.I., Parnell, S., Schewenius, M., Sendstad, M., Seto, K.C., Wilkinson, C. (Eds.), 2013b. *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1>
- Esperon-Rodriguez, M., Rymer, P.D., Power, S.A., Challis, A., Marchin, R.M., Tjoelker, M.G., 2020. Functional adaptations and trait plasticity of urban trees along a climatic gradient. *Urban For. Urban Green.* 54, 126771. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126771>
- Falster, D.S., Westoby, M., 2003. Plant height and evolutionary games. *Trends Ecol. Evol.* 18, 337–343. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00061-2](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00061-2)
- Garnier, M.E., Navas, M.M.-L., 2013. Diversité fonctionnelle des plantes. De Boeck Supérieur.
- Galen, C., 1999. Why Do Flowers Vary? *BioScience* 49, 631–640. <https://doi.org/10.2307/1313439>
- Gregg, J.W., Jones, C.G., Dawson, T.E., 2003. Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature* 424, 183–187. <https://doi.org/10.1038/nature01728>
- Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, N.E., Redman, C.L., Wu, J., Bai, X., Briggs, J.M., 2008. Global Change and the Ecology of Cities. *Science* 319, 756–760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- Guo, P., Yu, F., Ren, Y., Liu, D., Li, J., Ouyang, Z., Wang, X., 2018. Response of Ruderal Species Diversity to an Urban Environment: Implications for Conservation and Management. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 2832. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122832>
- Hahs, A.K., McDonnell, M.J., McCarthy, M.A., Veski, P.A., Corlett, R.T., Norton, B.A., Clemants, S.E., Duncan, R.P., Thompson, K., Schwartz, M.W., Williams, N.S.G., 2009. A global synthesis of plant extinction rates in urban areas. *Ecol. Lett.* 12, 1165–1173. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01372.x>
- Hummel, I., Vile, D., Violle, C., Devaux, J., Ricci, B., Blanchard, A., Garnier, É., Roumet, C., 2007. Relating root structure and anatomy to whole-plant functioning in 14 herbaceous Mediterranean species. *New Phytol.* 173, 313–321. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01912.x>
- Kuriya, S., Hattori, M., Nagano, Y., Itino, T., 2015. Altitudinal flower size variation correlates with local pollinator size in a bumblebee-pollinated herb, *Prunella vulgaris* L. (Lamiaceae). *J. Evol. Biol.* 28, 1761–1769. <https://doi.org/10.1111/jeb.12693>
- Mao, L., Swenson, N.G., Sui, X., Zhang, J., Chen, S., Li, J., Peng, P., Zhou, G., Zhang, X., 2020. The geographic and climatic distribution of plant height diversity for 19,000 angiosperms in China. *Biodivers. Conserv.* 29, 487–502. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01895-5>
- Niklas, K.J., 2007. Maximum plant height and the biophysical factors that limit it. *Tree Physiol.* 27, 433–440. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.3.433>
- Pataki, D.E., Alig, R.J., Fung, A.S., Golubiewski, N.E., Kennedy, C.A., McPherson, E.G., Nowak, D.J., Pouyat, R.V., Romero Lankao, P., 2006. Urban ecosystems and the North American carbon cycle: URBAN ECOSYSTEMS AND THE NORTH AMERICAN CARBON CYCLE. *Glob. Change Biol.* 12, 2092–2102. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01242.x>

- Pierce, L.L., Running, S.W., Walker, J., 1994. Regional-Scale Relationships of Leaf Area Index to Specific Leaf Area and Leaf Nitrogen Content. *Ecol. Appl.* 4, 313–321. <https://doi.org/10.2307/1941936>
- Ramalho, C.E., Laliberté, E., Poot, P., Hobbs, R.J., 2014. Complex effects of fragmentation on remnant woodland plant communities of a rapidly urbanizing biodiversity hotspot. *Ecology* 95, 2466–2478. <https://doi.org/10.1890/13-1239.1>
- Robinson, S.L., Lundholm, J.T., 2012. Ecosystem services provided by urban spontaneous vegetation. *Urban Ecosyst* 13.
- Schenk, H.J., Jackson, R.B., 2002. THE GLOBAL BIOGEOGRAPHY OF ROOTS. *Ecol. Monogr.* 72, 311–328. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2002\)072\[0311:TGBOR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2002)072[0311:TGBOR]2.0.CO;2)
- Searle, S.Y., Turnbull, M.H., Boelman, N.T., Schuster, W.S.F., Yakir, D., Griffin, K.L., 2012. Urban environment of New York City promotes growth in northern red oak seedlings. *Tree Physiol.* 32, 389–400. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps027>
- Song, G., Wang, J., Han, T., Wang, Q., Ren, H., Zhu, H., Wen, X., Hui, D., 2019. Changes in plant functional traits and their relationships with environmental factors along an urban-rural gradient in Guangzhou, China. *Ecol. Indic.* 106, 105558. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105558>
- Sukopp, H., 2004. Human-caused impact on preserved vegetation. *Landsc. Urban Plan.* 68, 347–355. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(03\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(03)00152-X)
- Thompson, K., Jones, A., 1999. Human Population Density and Prediction of Local Plant Extinction in Britain. *Conserv. Biol.* 13, 185–189. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97353.x>
- Vermeulen, P.J., Anten, N.P.R., Schieving, F., Werger, M.J.A., During, H.J., 2008. Height convergence in response to neighbour growth: genotypic differences in the stoloniferous plant *Potentilla reptans*. *New Phytol.* 177, 688–697. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02301.x>
- Wenzel, A., Grass, I., Belavadi, V.V., Tschardtke, T., 2020. How urbanization is driving pollinator diversity and pollination – A systematic review. *Biol. Conserv.* 241, 108321. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108321>
- Williams, N.S.G., Hahs, A.K., Vesk, P.A., 2015. Urbanisation, plant traits and the composition of urban floras. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* 17, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2014.10.002>
- Williams, N.S.G., Morgan, J.W., McDonnell, M.J., McCarthy, M.A., 2005. Plant traits and local extinctions in natural grasslands along an urban-rural gradient: *Plant extinctions along an urban-rural gradient*. *J. Ecol.* 93, 1203–1213. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2005.01039.x>
- Williams, N.S.G., Schwartz, M.W., Vesk, P.A., McCarthy, M.A., Hahs, A.K., Clemants, S.E., Corlett, R.T., Duncan, R.P., Norton, B.A., Thompson, K., McDonnell, M.J., 2009. A conceptual framework for predicting the effects of urban environments on floras. *J. Ecol.* 97, 4–9. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01460.x>

## Annexes

### 1. Fiche utilisée dans le repérage des prairies

	Description de la prairie N°	Description de la prairie N°	Description de la prairie N°
	Date de repérage	Date de repérage	Date de repérage
	Observateurs	Observateurs	Observateurs
Type de fréquentation (enfants, sports...)			
Accessibilité (une seule entrée - complètement perméable)			
Forme urbaine (résidentielle bas, haut, zone d'activité, ...)			
Intensité de gestion (faible--forte)			
Complexité de la végétation (continue--discontinue)			
Fond floristique (espèces dominantes)			
Niveau d'embroussaillage (présence de jeunes ligneux)			
Degré d'hygrométrie du sol (présence d'eau, homogène ou hétérogène : zone déprimée, linéaire plus humide, bordure de cours d'eau)			
Autres remarques			

**2. Questionnaire réalisé afin de récolter les données de gestion**

# Projet EvolVille : Gestion des espaces herbacés urbain

Ce questionnaire a pour but de recueillir des informations sur la gestion des espaces herbacés urbains de Strasbourg et de faire le lien avec la diversité floristique recensée.

**\*Obligatoire**

1. Adresse e-mail \*

---

2. Quel est le numéro de votre site ? \*

retrouver votre terrain sur : [https://www.google.com/maps/d/edit?mid=1XXaMWND5gKHF\\_KbMzybcGyDPSTam5ebO&usp=sharing](https://www.google.com/maps/d/edit?mid=1XXaMWND5gKHF_KbMzybcGyDPSTam5ebO&usp=sharing)

---

3. Gestionnaire du site \*

---

4. Fréquentation de l'espace herbacé \*

*Une seule réponse possible.*

- ☐ nulle
- ☐ très faible
- ☐ faible
- ☐ moyenne
- ☐ forte
- ☐ très forte

## 5. Dernier(s) mode(s) d'occupation du sol connu avant l'espace herbacé \*

*Une seule réponse possible.*

☐ bâti

☐ culture

☐ industrie

☐ décharge

☐ boisement

☐ carrière

☐ Autre : \_\_\_\_\_

## 6. Date de création de l'espace \*

\_\_\_\_\_

## 7. Semis ou sursemis à la mise en place ? \*

*Une seule réponse possible.*

☐ oui

☐ non

## 8. Si oui, avez-vous la liste des espèces semées ?

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## 9. Type de fauche \*

*Une seule réponse possible.*

☐ coupée (lame, faux, tondeuse)

☐ broyée (rotofil, gyrobroyage)

☐ aucune

## 10. Export des résidus de fauche?

*Plusieurs réponses possibles.*

☐ Oui

☐ Non

## 11. À quelles dates sont effectuées les fauches ?

---

---

---

---

---

## 12. Fréquences des fauches (nombre de fauches par an) \*

---

## 13. Traitements phytosanitaires \*

*Une seule réponse possible.*

- ☐ aucun
- ☐ insecticide
- ☐ herbicide
- ☐ fongicide
- ☐ anti-mousses
- ☐ anti-limaces
- ☐ autre

## 14. pression de gestion non contrôlée \*

*Une seule réponse possible.*

- ☐ cueillette
- ☐ pâturage et terriers par les lapins et rongeurs
- ☐ incendie
- ☐ travaux sur la parcelle
- ☐ aucune
- ☐ Autre : \_\_\_\_\_

---

Ce contenu n'est ni rédigé, ni cautionné par Google.

Google Forms

### 3. Typologies de la couche d'occupation des sols fournie par GeoGrandEst et nouvelles typologies

typologies de la base de données OCSGE2	Typologies du projet EvolVille
Bâti continu dense	Bâti continu
Bâti continu aéré	
Bâti collectif	Bâti discontinu
Bâti mixte	
Bâti individuel dense	
Bâti individuel lâche	
Bâti isolé en zone agricole ou naturelle	
Espaces libres en milieu urbain	
Emprises scolaires et universitaires	Equipements et infrastructures collectives
Emprises hospitalières	
Equipements sportifs et de loisirs ; campings	
Cimetières	
Autres équipements collectifs	
Équipements eau, énergies, T.I.C. et déchets	
Emprises d'activités à dominante industrielle	Activités économiques
Emprises d'activités à dominante commerciale	
Emprises d'activité à dominante mixte ou tertiaire	
Anciennes emprises d'activité	
Zones d'extraction	
Emprises militaires	
Emprise réseau ferré	Forêts ou activités économiques
Emprise réseau routier	
Espaces associés aux réseaux routiers et ferrés	
Emprises aéroportuaires	
Emprises portuaires	
Places	
Espaces verts urbains	Espaces verts urbains
Espaces en transition	Espaces en transition
Exploitations agricoles	Territoires agricoles
Cultures annuelles et pluri-annuelles	
Cultures spécifiques	
Vignes	
Vergers traditionnels	
Vergers intensifs	
Pépinières	
Bosquets et haies	
Surfaces enherbées, friches et délaissés agricoles	Espaces herbacées
Pelouses et pâturages de montagne	
Surfaces enherbées semi-naturelles	
Plages et sables	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation
Roches nues	
Zones de sinistre (incendie, tempête)	
Formations pré- forestières	Forêts
Forêts de feuillus	
Forêts de conifères	

Forêts mixtes	Eau
Peupleraies et sapinières	
Coupes à blanc et jeunes plantations	
Ripisylves et rivulaires	
Autres milieux humides	
Cours d'eau et canaux	
Plans d'eau	
Bassins artificiels	

#### 4. Type de mesure des parties reproductives effectuée pour chacune des espèces

Espèces mesurés	Structures mesurées
<i>Achillea millefolium</i>	diamètre du capitule
<i>Agrimonia eupatoria</i>	diamètre de la fleur
<i>Agrostis stolonifera</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Alopecurus pratensis</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Arrhenatherum elatius</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Avenula pubescens</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Bellis perennis</i>	diamètre du capitule
<i>Bromus hordeaceus</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Bunias orientalis</i>	diamètre de la fleur
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	diamètre de la fleur
<i>Cerastium fontanum</i>	diamètre de la fleur
<i>Convolvulus arvensis</i>	hauteur de la fleur
<i>Dactylis glomerata</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Erigeron annuus</i>	diamètre du capitule
<i>Ervilia hirsuta</i>	longueur de la fleur
<i>Ervum tetraspermum</i>	longueur de la fleur
<i>Galium album</i>	diamètre de la fleur
<i>Galium aparine</i>	diamètre de la fleur
<i>Galium verum</i>	diamètre de la fleur
<i>Geranium dissectum</i>	diamètre de la fleur
<i>Geranium molle</i>	diamètre de la fleur
<i>Geranium pyrenaicum</i>	diamètre de la fleur
<i>Holcus lanatus</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Hypericum perforatum</i>	diamètre de la fleur
<i>Hypochaeris radicata</i>	diamètre de l'inflorescence
<i>Knautia arvensis</i>	Longueur de la fleur
<i>Leucanthemum ircutianum</i>	diamètre du capitule
<i>Lolium perenne</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Lotus corniculatus</i>	longueur de la fleur
<i>Medicago lupulina</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Medicago minima</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Medicago sativa subsp. falcata</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Melilotus albus</i>	longueur de la fleur
<i>Onobrychis viciifolia</i>	longueur de la fleur
<i>Petrorhagia prolifera</i>	diamètre de la fleur
<i>Plantago lanceolata</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Plantago major</i>	longueur de l'inflorescence

<i>Poa annua</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Poa pratensis</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Poa trivialis</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Potentilla reptans</i>	diamètre de la fleur
<i>Ranunculus acris</i>	diamètre de la fleur
<i>Ranunculus bulbosus</i>	diamètre de la fleur
<i>Rhinanthus alectorolophus</i>	longueur de la fleur
<i>Rubus caesius</i>	diamètre de la fleur
<i>Sherardia arvensis</i>	diamètre de la fleur
<i>Silene vulgaris</i>	longueur de la fleur
<i>Thymus pulegioides</i>	diamètre de la fleur
<i>Trifolium campestre</i>	longueur de l'inflorescence
<i>Trifolium pratense</i>	longueur de la fleur
<i>Trifolium repens</i>	longueur de la fleur
<i>Veronica arvensis</i>	diamètre de la fleur
<i>Vicia segetalis</i>	longueur de la fleur
<i>Vulpia myuros</i>	longueur de l'inflorescence

## 5. Résultats généraux de l'études par sites

site	HR	TF	SLA	Rouge	Vert	Bleu	Formes urbaines	Classes de gestion	Surface
1	47.29	1.65	15.51	NA	NA	NA	Zone naturelle	Fauches ponctuelles coupées	2.01
4	58.98	4.27	21.58	NA	NA	NA	Zone naturelle	Fauches ponctuelles coupées	1.54
5	72.56	2.02	17.35	NA	NA	NA	Zone naturelle	Fauches ponctuelles coupées	1.22
6	45.04	2.95	18.84	NA	NA	NA	Zone naturelle	Fauches ponctuelles coupées	2.16
10	16.31	1.16	37.54	192.43	178.88	145.86	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles coupées	0.23
11	16.56	1.01	18.14	196.35	135.13	129.76	Zone urbaine	Fauches régulières	0.23
18	26.15	1.58	22.92	208.40	196.45	169.07	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles broyées	0.49
21	69.52	5.31	19.76	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles broyées	0.43
23	15.47	1.13	50.39	NA	NA	NA	Zone urbaine	Fauches régulières	0.39
24	17.67	2.16	19.25	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches régulières	0.27
27	54.92	1.21	13.96	NA	NA	NA	Zone naturelle	Fauches ponctuelles coupées	0.78
30	47.58	2.33	16.77	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Aucune fauche	0.39
31	41.46	1.50	18.65	NA	NA	NA	Zone portuaire industrielle	Aucune fauche	0.62
32	22.36	0.81	20.68	212.53	204.91	137.54	Zone portuaire industrielle	Fauches ponctuelles broyées	0.22
34	34.19	5.05	16.71	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles broyées	0.19
35	74.27	2.40	21.79	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles coupées	0.41
36	46.96	1.36	16.71	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles broyées	0.14
37	40.39	1.28	17.79	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches régulières	0.26
40	37.97	2.46	28.47	190.94	165.02	125.11	Zone péri-urbaine	Fauches régulières	0.15

43	62.48	4.56	22.69	NA	NA	NA	Zone portuaire industrielle	Aucune fauche	0.26
44	104.76	2.94	11.18	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles broyées	0.29
45	22.00	1.13	21.50	193.14	174.93	112.17	Zone péri-urbaine	Fauches régulières	0.27
46	16.28	0.98	22.70	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches régulières	0.31
49	11.41	1.67	24.28	201.78	178.67	148.59	Zone urbaine	Fauches régulières	0.11
55	47.32	1.94	16.46	NA	NA	NA	Zone portuaire industrielle	Fauches ponctuelles broyées	1.03
56	43.95	1.26	18.91	212.06	192.89	133.48	Zone portuaire industrielle	Aucune fauche	0.42
58	55.39	1.75	12.75	NA	NA	NA	Zone naturelle	Fauches ponctuelles coupées	9.12
59	25.98	1.09	22.55	NA	NA	NA	Zone portuaire industrielle	Fauches ponctuelles broyées	3.26
61	88.64	1.26	13.08	NA	NA	NA	Zone naturelle	Fauches ponctuelles coupées	8.85
62	12.32	3.41	22.25	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles broyées	0.27
63	58.18	0.99	14.20	NA	NA	NA	Zone naturelle	Fauches ponctuelles coupées	1.50
65	17.84	0.68	19.19	239.23	199.63	102.37	Zone portuaire industrielle	Fauches ponctuelles coupées	0.82
66	41.15	12.68	9.51	NA	NA	NA	Zone naturelle	Aucune fauche	0.10
67	24.50	1.36	27.25	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles coupées	0.70
68	55.90	3.40	29.02	NA	NA	NA	Zone portuaire industrielle	Aucune fauche	0.20
69	13.97	0.96	19.85	NA	NA	NA	Zone naturelle	Fauches régulières	0.59
70	37.52	1.47	19.14	192.93	173.50	150.67	Zone urbaine	Fauches régulières	0.58
72	60.77	1.83	19.57	NA	NA	NA	Zone urbaine	Fauches ponctuelles coupées	1.37
74	25.46	1.78	18.54	226.09	187.12	74.81	Zone urbaine	Fauches régulières	0.21
75	13.46	1.63	37.77	238.45	210.52	196.13	Zone urbaine	Fauches régulières	0.15
78	29.81	1.21	17.71	220.19	201.72	159.16	Zone péri-urbaine	Fauches régulières	0.22
79	15.46	0.42	28.80	214.37	201.55	181.21	Zone portuaire industrielle	Fauches régulières	0.20
85	62.47	5.07	27.25	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Aucune fauche	0.13
87	127.68	9.07	13.81	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles broyées	2.99
88	21.94	1.79	16.82	NA	NA	NA	Zone urbaine	Fauches ponctuelles coupées	0.41
89	23.34	2.68	22.05	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles coupées	0.37
91	13.77	0.48	16.76	206.83	194.77	167.75	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles coupées	0.34
92	15.08	1.04	21.37	222.91	213.61	188.13	Zone péri-urbaine	Fauches régulières	0.86
94	30.01	1.84	26.21	211.30	200.00	151.33	Zone péri-urbaine	Fauches régulières	0.49
95	55.07	0.99	17.28	208.63	187.21	162.96	Zone urbaine	Fauches ponctuelles coupées	0.40
96	48.99	6.57	11.76	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches régulières	0.61
97	63.93	5.74	17.01	NA	NA	NA	Zone péri-urbaine	Fauches ponctuelles coupées	2.20
103	20.71	1.54	22.88	212.80	193.88	172.68	Zone péri-urbaine	Fauches régulières	0.78

Les valeurs moyennes de communautés sont présentées pour la hauteur reproductive (HR), la taille des fleurs (TF), la SLA ainsi que les valeurs de rouge de vert et de bleu. Les formes urbaines, les classes de gestion et la surface sont également détaillées.

## 6. Résultats généraux de l'études par espèces

Espèces	Nb. de sites	HR	TF	SLA	R	V	B
<i>Achillea millefolium</i>	3	60.23	0.66	10.52	NA	NA	NA
<i>Agrimonia eupatoria</i>	1	41.28	1.12	11.20	253.32	210.75	48.69
<i>Agrostis stolonifera</i>	1	55.92	8.70	44.55	NA	NA	NA
<i>Alopecurus pratensis</i>	2	152.66	24.83	15.57	NA	NA	NA
<i>Arrhenatherum elatius</i>	3	114.87	15.65	20.39	NA	NA	NA
<i>Avenula pubescens</i>	1	75.16	9.46	23.00	NA	NA	NA
<i>Bellis perennis</i>	13	13.02	1.78	32.86	NA	NA	NA
<i>Bromus hordeaceus</i>	1	19.04	3.92	16.69	NA	NA	NA
<i>Bunias orientalis</i>	1	82.32	1.00	17.19	249.15	229.04	23.18
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	5	19.33	0.19	36.92	206.48	205.87	179.95
<i>Cerastium fontanum</i>	4	20.13	0.70	14.19	NA	NA	NA
<i>Convolvulus arvensis</i>	2	46.47	2.10	26.79	NA	NA	NA
<i>Dactylis glomerata</i>	19	101.97	9.87	21.33	NA	NA	NA
<i>Erigeron annuus</i>	4	66.34	1.89	18.89	NA	NA	NA
<i>Ervilia hirsuta</i>	1	88.96	1.24	14.89	NA	NA	NA
<i>Ervum tetraspermum</i>	1	70.44	0.60	9.56	172.90	161.02	196.50
<i>Galium album</i>	21	57.48	0.43	4.02	NA	NA	NA
<i>Galium aparine</i>	2	138.89	0.15	2.76	174.67	161.39	106.44
<i>Galium verum</i>	1	50.42	0.30	2.91	NA	NA	NA
<i>Geranium dissectum</i>	1	20.24	0.50	17.43	172.23	42.14	128.69
<i>Geranium molle</i>	1	9.48	0.94	28.02	210.04	98.14	194.56
<i>Geranium pyrenaicum</i>	1	49.12	1.48	16.53	NA	NA	NA
<i>Holcus lanatus</i>	1	87.30	11.34	40.21	NA	NA	NA
<i>Hypericum perforatum</i>	1	48.38	2.10	8.08	235.89	169.55	47.18
<i>Hypochaeris radicata</i>	2	48.50	3.26	20.98	200.04	149.14	38.71
<i>Knautia arvensis</i>	1	67.34	1.22	12.71	NA	NA	NA
<i>Leucanthemum ircutianum</i>	1	91.24	1.96	17.54	NA	NA	NA
<i>Lolium perenne</i>	4	32.89	10.28	17.63	NA	NA	NA
<i>Lotus corniculatus</i>	25	37.07	1.47	21.03	NA	NA	NA
<i>Medicago lupulina</i>	34	27.73	0.54	25.39	NA	NA	NA
<i>Medicago minima</i>	1	21.10	0.48	31.66	NA	NA	NA
<i>Medicago sativa subsp. falcata</i>	1	29.54	1.32	14.59	NA	NA	NA
<i>Melilotus albus</i>	1	53.68	0.40	15.90	NA	NA	NA
<i>Onobrychis viciifolia</i>	1	95.60	1.16	12.16	NA	NA	NA
<i>Petrorhagia prolifera</i>	4	46.25	1.20	3.06	NA	NA	NA
<i>Plantago lanceolata</i>	48	42.68	2.07	17.93	NA	NA	NA
<i>Plantago major</i>	1	39.40	2.98	22.18	NA	NA	NA
<i>Poa annua</i>	1	8.86	1.92	9.67	NA	NA	NA
<i>Poa pratensis</i>	3	18.02	3.82	31.41	NA	NA	NA
<i>Poa trivialis</i>	1	83.08	12.24	31.74	NA	NA	NA
<i>Potentilla reptans</i>	3	37.83	1.79	20.02	228.26	197.45	35.79

<i>Ranunculus acris</i>	2	44.33	1.70	21.70	238.77	170.63	47.71
<i>Ranunculus bulbosus</i>	1	22.54	1.96	17.97	247.90	214.68	40.33
<i>Rhinanthus alectorolophus</i>	2	39.56	1.96	8.78	NA	NA	NA
<i>Rubus caesius</i>	2	57.13	2.25	13.70	223.14	199.60	216.82
<i>Sherardia arvensis</i>	1	10.70	0.32	2.85	209.32	164.91	212.81
<i>Silene vulgaris</i>	1	55.98	2.28	13.82	NA	NA	NA
<i>Thymus pulegioides</i>	2	19.13	11.74	9.20	210.74	125.21	195.39
<i>Trifolium campestre</i>	4	33.50	0.82	35.90	NA	NA	NA
<i>Trifolium pratense</i>	23	43.32	1.40	20.40	NA	NA	NA
<i>Trifolium repens</i>	18	21.00	0.88	21.07	NA	NA	NA
<i>Veronica arvensis</i>	6	8.69	0.21	32.40	178.99	170.92	167.44
<i>Vicia segetalis</i>	1	48.22	1.20	15.21	129.97	44.03	99.46
<i>Vulpia myuros</i>	2	43.19	17.16	16.79	NA	NA	NA

Les valeurs moyennes par espèces sont présentées pour la hauteur reproductive (HR), la taille des fleurs (TF), la SLA ainsi que les valeurs de rouge (R) de vert (V) et de bleu (B). Le nombre de sites est également indiqué.

## 7. Résultats des tests ANOVA au niveau spécifique

variables réponses	Variables explicatives	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)
Taille des fleurs	Classes de gestion	0.94022	0.31341	3	45.813	2.6388	0.06072 .
	Formes urbaines	0.95051	0.31684	3	45.554	2.6677	0.05880 .
	Surface	0.00513	0.00513	1	45.193	0.0432	0.83626
Hauteur reproductive	Classes de gestion	1.33483	0.44494	3	44.635	4.3791	0.008722**
	Formes urbaines	0.37849	0.12616	3	44.526	1.2417	0.305899
	Surface	0.59971	0.59971	1	44.429	5.9023	0.01923*
SLA	Classes de gestion	0.42768	0.14256	3	44.34	0.816	0.4919
	Formes urbaines	0.3171	0.1057	3	44.042	0.605	0.61523
	Surface	0.81524	0.81524	1	43.69	4.6664	0.03629 *
Valeur de rouge	Classes de gestion	0.02778	0.0092614	3	30.299	0.9479	0.4298
	Formes urbaines	0.01712	0.0057067	3	29.213	0.5841	0.6302
	Surface	0.00824	0.0082411	1	30.956	0.8435	0.3655
Valeur de vert	Classes de gestion	0.05381	0.0179377	3	31.547	0.8539	0.475
	Formes urbaines	0.07195	0.0239823	3	30.47	1.1417	0.3479
	Surface	0.00772	0.0077231	1	32.191	0.3677	0.5485
Valeur de bleu	Classes de gestion	0.02343	0.007811	3	29.311	0.1191	0.94815
	Formes urbaines	0.53655	0.178851	3	28.052	2.7272	0.06285.
	Surface	0.00133	0.00133	1	30.668	0.0203	0.88767

Signif. codes : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

## 8. Résultats des tests ANOVA au niveau communautaire

variables réponses	Variables explicatives	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Taille des fleurs	Classes de gestion	3	4.7579	1.58597	4.9092	0.004909 **
	Formes urbaines	3	5.8604	1.95347	6.0467	0.001502 **
	Surface	1	0.0359	0.03587	1.1007	0.299708
Hauteur reproductive	Classes de gestion	3	0.45842	0.152808	2.2526	0.09516
	Formes urbaines	3	0.73089	0.243629	3.5915	0.0268*
	Surface	1	0.08286	0.082862	1.5839	0.21468
SLA	Classes de gestion	3	5.7156	1.90519	7.982	0.0002256***
	Formes urbaines	3	1.367	0.45568	1.9091	0.1416686
	Surface	1	0.963	0.96297	8.429	0.0057025**
Valeur de rouge	Classes de gestion	3	0.00102	0.0003399	0.0603	0.9802
	Formes urbaines	2	0.020653	0.0068843	1.2212	0.3191
	Surface	1	0.001347	0.0013465	0.2389	0.6286
Valeur de vert	Classes de gestion	3	0.12401	0.041336	1.5098	0.2321
	Formes urbaines	2	0.15999	0.05333	1.9479	0.1432
	Surface	1	0.00032	0.000315	0.0115	0.9153
Valeur de bleu	Classes de gestion	3	0.34016	0.113386	1.2557	0.3072
	Formes urbaines	2	0.12781	0.042602	0.4718	0.7042
	Surface	1	0.02233	0.022325	0.2472	0.6226

Signif. codes : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

## 9. Détails des résultats de l'ACP : corrélation des variables avec les axes

Axes	variables paysagères	correlation	p.value
Axe 1 : Artificialisation	équipements collectifs	0.65	0.00
	Hauteur de bâti moyenne	0.63	0.00
	Bâti continu	0.51	0.00
	Bâti discontinu	0.34	0.01
	Espaces herbacés	-0.56	0.00
	Forêt	-0.73	0.00
	Territoires agricoles	-0.73	0.00
Axe 2 : Densification	HBat_mean	0.46	0.00
	bat_cont	0.46	0.00
	equi_coll	0.42	0.00
	foret	0.41	0.00
	terr_agri	0.32	0.01
	esp_herb	0.29	0.02
	act_eco	-0.51	0.00
	eau	-0.52	0.00
	infra_transp	-0.57	0.00

## 10. Détails des résultats de l'HCPC : corrélation des variables avec les groupes

Classes urbaines	Variables paysagères	v.test	Mean in category	Overall mean	sd in category	Overall sd	p.value
Espaces naturels à semi-naturels	Forêt	5.54	37.76	10.92	22.30	18.64	0.00
	Territoires agricoles	5.05	10.69	2.43	10.08	6.30	0.00
	Espaces herbacés	4.93	21.04	5.95	16.76	11.80	0.00
	Bâti discontinu	-2.53	2.26	12.35	4.87	15.32	0.01
	équipements collectifs	-2.98	3.54	20.39	6.09	21.79	0.00
	infrastructures de transport	-3.45	5.43	20.93	6.52	17.30	0.00
Espaces portuaires et industriels	infrastructures de transport	-3.89	40.50	20.93	21.63	17.30	0.00
	Eau	-3.63	12.23	4.82	11.35	7.03	0.00
	activités économiques et industrielles	3.33	17.49	6.61	16.38	11.23	0.00
	équipements collectifs	-2.49	4.61	20.39	5.14	21.79	0.01
	Hauteur de bâti moyenne	-3.17	6.83	10.63	1.29	4.11	0.00
Espaces péri-urbains	Bâti discontinu	3.63	20.29	12.35	18.18	15.32	0.00
	Forêt	-1.98	5.64	10.92	10.40	18.64	0.05
	Bâti continu	-2.07	0.35	2.20	0.74	6.28	0.04
	Territoires agricoles	-2.58	0.10	2.43	0.25	6.30	0.01
Espaces urbains	Bâti continu	5.36	11.99	2.20	10.75	6.28	0.00
	équipements collectifs	5.31	54.04	20.39	21.90	21.79	0.00
	Hauteur de bâti moyenne	3.44	14.74	10.63	3.36	4.11	0.00
	Eau	-2.03	0.66	4.82	1.67	7.03	0.04