

Master 2 Espace et Milieux – Territoires Écologiques

Année 2019-2020

Impact de l'urbanisation sur la flore des espaces herbacés et ses traits fonctionnels

Clément GROS

Tuteurs de stage : Audrey MURATET & Laurent HARDION

Référente scientifique : Marianne COHEN

Structure d'accueil : Laboratoire Image, Ville, Environnement - LIVE - UMR 7362 du CNRS et de l'Université de Strasbourg



REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je tiens à remercier très chaleureusement **Audrey Muratet** et **Laurent Hardion** de m'avoir fait confiance pour ce projet, pour leur soutien de tout instant et pour toute l'aide qu'ils m'ont apporté au cours de ces six derniers mois.

Merci à la ZAEU d'avoir rendu ce stage possible et en particulier à **Sandrine Glatron**.

Merci à **Marianne Cohen** d'avoir accepté d'être référente scientifique pour ce stage et pour ses conseils.

Merci à toutes les personnes qui ont apportés leur aide à cette étude. Je pense notamment à **Mina Charnaux**, **Adine Hector** et aux gestionnaires des espaces verts, à **Pierre-Alexis Herrault** pour son aide en cartographie et à **Anne Puissant** et **Christophe Enaux** pour leur implication dans le projet.

Merci au personnel de l'aérodrome et du port autonome de Strasbourg pour nous avoir permis d'y faire nos mesures.

Merci à mes camarades de promo sans qui cette année n'aurait pas eu la même saveur.

Merci à mes professeurs **François Bouteau**, **Étienne Grésillon**, **Denis Chartier** et **Patrick Laurenti** pour leur bienveillance et leur soutien tout au long de cette année atypique.

Je remercie enfin tous mes collègues de bota **Marion Martinez**, **Éloïse Lenormand**, **Guillaume Jacek**, **Éole Cézard**, **Armando Espinosa** et **Étienne Chanez**, pour leur accueil et leur bonne humeur quotidienne et pour m'avoir fait découvrir l'Alsace comme il se doit Je leur souhaite beaucoup de réussite dans tous leurs projets.

SOMMAIRE

Introduction	5
Contexte général : les milieux urbains, un laboratoire de recherche	5
Une approche fonctionnelle ?	6
Évol' Ville : L'évolution s'invite en ville	7
1 État des connaissances actuelles	8
1.1 Traits : Un terme ambigu ?	8
1.2 Plasticité phénotypique ou différenciation génétique ?	10
2 Description du matériel et développement d'une méthode de mesure de traits communautaires et spécifique <i>in situ</i>	12
2.1 Sélection des sites	12
2.1.1 Répartition des sites selon un gradient d'urbanisation et de gestion.....	12
2.2 Sélection des traits	17
2.2.1 Croissance	18
2.2.2 Reproduction	20
2.2.3 Survie	22
2.2.4 Choix des traits.....	22
2.3 Sélection des espèces.....	23
2.4 Protocole de mesure de traits.....	24
2.4.1 Sur le terrain	25
2.4.2 En laboratoire	27
2.5 Méthode d'analyse statistique	28
3 Résultats	30
3.1 Niveau taxonomique.....	31
3.2 Niveau fonctionnel	31
4 Discussion	39
4.1 Retour sur les résultats.....	39

4.2 Limites et perspectives	41
Conclusion.....	43
Liste des abréviations	44
Liste des figures	44
Liste des Tableaux.....	45
Bibliographie	46
Annexes	52
Résumé	66
Abstract	66

INTRODUCTION

CONTEXTE GENERAL : LES MILIEUX URBAINS, UN LABORATOIRE DE RECHERCHE

Malgré quelques travaux naturalistes avant-gardistes en milieu urbain remontant au 18^{ème} siècle (Willdenow 1787 ; Sukopp 2008), l'écologie s'intéressait traditionnellement à l'étude de la nature que l'on opposait alors aux villes, voire à tout ce qui est lié à l'humain. Terrasson critiquait en 1988 dans « La peur de la Nature » notre réflexe à mettre sous cloche ce qui était considéré comme naturel en l'opposant à l'anthropique. Les recherches en écologie urbaine ont alors longtemps été considérées comme indignes (Wu 2014 ; Collins *et al.* 2000 ; Niemelä 1999, Cochard 2019 ; Arnould et Simon 2007) et les villes étaient perçues comme des espaces dénués de vie, où toutes ses espèces étaient vouées à disparaître (Sukopp 1998 ; Wolf, et Celecia 1999). Ce n'est qu'à partir des années 1940 que les villes ont été considérées comme un écosystème à part entière permettant de l'approcher sous un regard écologique (Sukopp 2008 ; Wu 2014).

Dans les années 1980, les progrès techniques en télédétection et en informatique ont permis l'émergence de l'écologie du paysage (Wu 2013). Les actions humaines ont donc pris une part de plus en plus importante dans les études écologiques en ville (Wu et Hobbs 2007 ; Wu 2013). Au-delà de cette recherche plutôt fondamentale, la prise de conscience généralisée des changements globaux a mis en avant les milieux urbains. L'un des moteurs de cet intérêt est le changement rapide d'occupation du sol comme première cause d'extinction d'espèces (Balmford & Bond, 2005). Cela s'explique notamment par la fragmentation et la destruction des habitats qui transforment des espaces larges et homogènes en espaces plus restreints mais également plus hétérogènes et séparés les uns des autres (Ewers & Didham, 2006). L'urbanisation étant le principal moteur de la fragmentation (McKinney, 2006), l'intérêt pour l'écologie urbaine est d'autant plus accentué.

De façon contre intuitive, cette diversité d'espaces tend à rendre les milieux urbains relativement riches en espèces. L'une des conséquences connues de la fragmentation des habitats est l'isolement spatial des populations, animales comme végétales. Sans échange entre elles, ces populations décroissent en nombre et en diversité génétique pouvant conduire à leur disparition (Bonsall et Hastings, 2004). On observe une homogénéité de cette diversité urbaine à travers les différentes villes du globe (McKinney 2006). Les pressions induites sur la biodiversité en milieu urbain sont proches et conduisent donc à son homogénéisation à l'échelle

mondiale. En 2018, l'ONU estime que d'ici 2050, deux tiers de la population mondiale vivra en milieu urbain. Ces chiffres tendent à montrer que les effets de fragmentation et de destruction des milieux « naturels » et d'homogénéisation de biodiversité vont s'intensifier dans les décennies à venir donnant une place majeure aux milieux urbains dans l'étude et le devenir de la biodiversité taxonomique et génétique.

UNE APPROCHE FONCTIONNELLE ?

Traditionnellement, l'écologie appréhende la diversité des communautés végétales sur la base de leur composition (richesse en espèces) et de leur structure (abondance des espèces). Cette diversité dite taxonomique a conduit à la création de différents indices permettant de noter un milieu (indice de Shannon, indice de Simpson) (Hill 1973). Plus récemment, une perception phylogénétique est venue s'ajouter. Elle se base sur la longueur moyenne du chemin, dans la classification hiérarchique, entre deux organismes choisis aléatoirement dans une communauté et tient donc compte de tous les niveaux taxonomiques (Clarke et Warwinck 1995).

Ces diversités ont plus récemment été enrichies par la diversité fonctionnelle. Elle découle des diversités évoquées précédemment en étudiant la diversité des fonctions accomplies par cette multitude d'organismes en relation avec les milieux qu'ils occupent (Garnier et Navas 2013). Tilman (1997) la définit comme l'étendue des différences fonctionnelles des espèces composant une communauté. Cette approche fonctionnelle offre des perspectives plus larges que les approches classiques, notamment par la comparaison des communautés taxonomiquement différentes mais fonctionnellement proches. Ce paradoxe peut être dû à une séparation géographique importante ou à une différence de milieux, comme ce que l'on peut trouver en ville. Dans l'ouvrage « Diversité fonctionnelle des plantes », Garnier et Navas retracent les origines de l'étude fonctionnelle du vivant. Théophraste (372-278 avant JC) peut être perçu comme un précurseur en proposant alors une classification morphologique des végétaux : arbres, arbrisseaux, sous-arbrisseau et plantes herbacées (Amigues 2010). Il faudra ensuite attendre le 19^{ème} siècle et l'apparition de la biogéographie avec Alexander von Humboldt pour voir apparaître les bases de cette future discipline. Plus tard, Braun-Blanquet (1928) et Raunkiaer (1934) proposeront une approche de la diversité par l'étude des types biologiques. Enfin, en 1974, Grime propose sa théorie des stratégies et le système « compétitive », « tolérance au stress » et « rudérale » dit CSR des types fonctionnels des plantes. Aujourd'hui, la diversité fonctionnelle est étudiée par la mesure de traits fonctionnels. Violle *et al.* définissent, en 2007, les traits fonctionnels comme « toutes caractéristiques

morphologiques, physiologiques ou phénologiques mesurables au niveau d'un individu, de la cellule à l'organisme sans qu'il soit fait référence à aucun autre niveau d'organisation ni à aucun facteur du milieu ».

ÉVOL' VILLE : L'EVOLUTION S'INVITE EN VILLE

Malgré le rôle central des milieux urbains dans le devenir de la biodiversité, les espaces herbacés des villes restent peu étudiés au regard des enjeux qu'ils représentent. On retrouve dans la littérature des comparaisons entre milieux semi-naturels ou naturels et milieux très anthropisés sans réellement se focaliser sur les habitats communs à ces deux milieux (Rupprecht et Byrne 2014 ; Rupprecht *et al.* 2015). De plus, dans l'imaginaire collectif, la nature en ville est souvent associée à des espaces très gérés alors qu'en réalité, l'hétérogénéité urbaine vaut aussi pour les pratiques de gestion. Ce paramètre s'avère n'être que rarement pris en compte dans les études des effets de l'urbanisation sur les communautés végétales.

Le projet Evol' Ville vise à mieux comprendre et considérer la biodiversité urbaine par une étude de la dimension fonctionnelle des communautés de plantes des espaces herbacés urbains au sein de différents contextes paysagers, de modes de gestion et d'intensité de fréquentation sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS).

Quels sont les liens entre la variabilité des traits fonctionnels de plantes de milieux herbacés et un double gradient de gestion et d'urbanisation et qu'indiquent-ils sur l'état fonctionnel de ces milieux ?

Mon stage de M2 et ce mémoire se positionnent en préfiguration du projet Evol' Ville. L'objectif central est de préparer le terrain pour les trois années à venir en définissant les sites et les espèces à intégrer au projet, en testant des protocoles de mesure de traits *in situ* et en analysant les premières données pour apporter un regard critique sur le travail effectué afin de soulever des points d'amélioration.

1 ÉTAT DES CONNAISSANCES ACTUELLES

1.1 TRAITS : UN TERME AMBIGU ?

Historiquement, le terme “trait” est passé du langage commun à différentes disciplines scientifiques (écologie fonctionnelle, physiologie, génétique). Il était alors utilisé comme prédicateur de performance des organismes (Darwin 1859). Avec l'émergence des études en écologie des communautés et des écosystèmes depuis ces 30 dernières années, le concept de trait a été forcé de s'étendre du niveau d'un individu à l'écosystème avec, à chaque niveau, des nouvelles utilisations du terme trait (annexe 1).

L'étude des plantes par le prisme de leurs fonctions peut s'avérer complexe. La quantification de la croissance, de la dissémination et de la durée de vie est presque impossible lorsque l'on sait que certaines espèces clonales peuvent vivre plusieurs milliers d'année (Thomas 2013), que les graines peuvent s'installer au pied de la plante mère comme à des kilomètres (Fenner et Thompson 2005) et que les parties souterraines d'une plante peuvent s'enfoncer sur plusieurs mètres et s'enchevêtrer avec d'autres. Cette quantification ne peut se faire qu'en passant par une simplification et une approximation de ces fonctions.

Par exemple, l'étude des caractéristiques d'une semence peut, permettre d'identifier les modes de dispersion d'une espèce. Une graine lourde aura ainsi tendance à tomber au pied de la plante mère. On parle de dissémination par barochorie. Des éléments accessoires comme des bractées ou des aigrettes indiquent plutôt une dissémination plus lointaine par le vent. Une faible densité indique une dissémination par l'eau (hydrochorie), et la présence d'un élaïosome indique que certains hyménoptères comme les fourmis sont un vecteur de dispersion privilégié (myrmécochorie). On peut également trouver chez certaines fabacées, des constriction de l'enveloppe externe du fruit qui s'ouvre brusquement à maturité, disséminant les graines sans vecteur extérieur (autochorie). Dans cet exemple, la fonction de dispersion de l'espèce est classée en catégories qui sont une approximation de cette fonction. De la même manière, il est possible de donner une valeur continue à la dispersion en mesurant la hauteur de reproduction ou la masse des graines. Plus les semences sont hautes et légères, plus elles seront dispersées loin (Cornelissen *et al.* 2003, Hammond *et al.* 1995). Les valeurs permettant l'approximation d'un trait sont nommées les attributs.

L'ensemble des fonctions et des marqueurs fonctionnels constituant des caractéristiques mesurables des organismes sont appelés traits (McGill *et al.* 2006). L'utilisation du terme

“trait” est préférée en écologie mais son sens est proche de « caractère phénotypique » qui appartient davantage au champ lexical des généticiens.

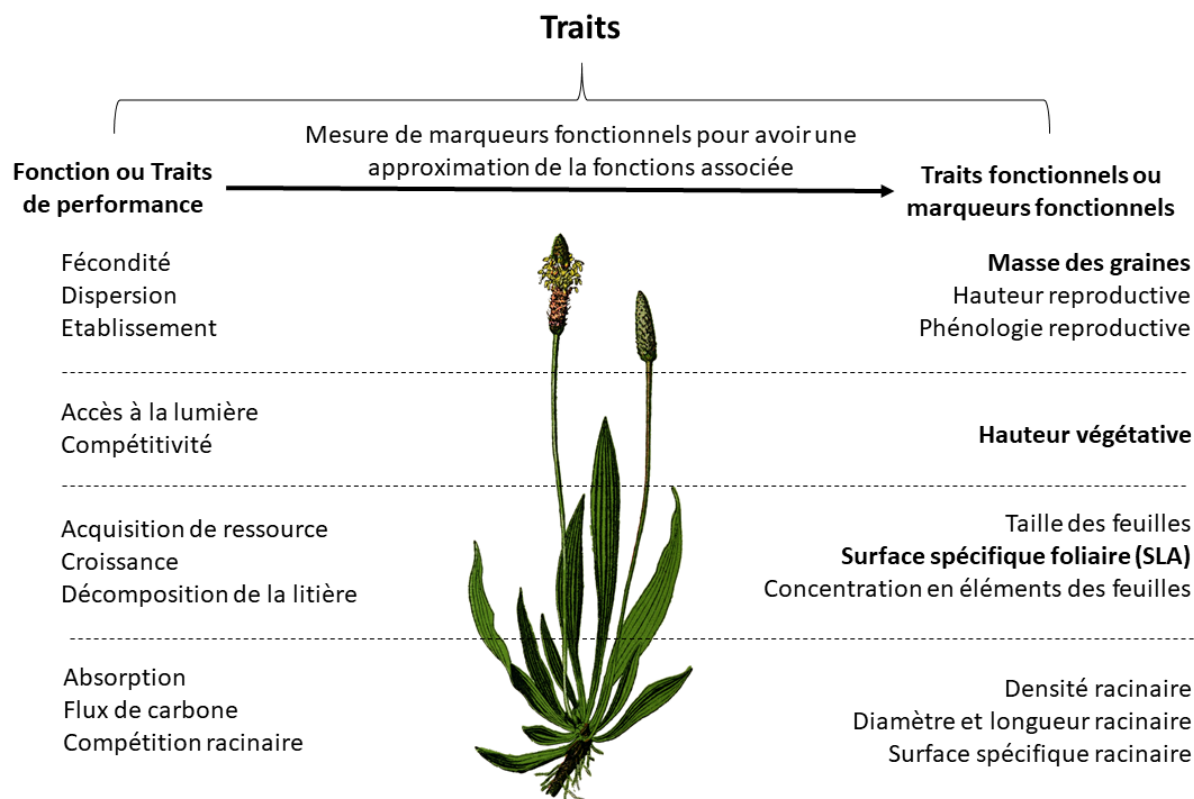


Figure 1 - Schéma inspiré de Garnier et Navas 2013 illustrant les différentes fonctions assurées par les plantes et les marqueurs fonctionnels associés

La figure 1 présente l’association de traits fonctionnels et de leur fonction. Les traits en gras sont les plus emblématiques. Aussi appelés « commun core », ils sont à la fois faciles à mesurer et analogues des principales fonctions de plantes (Weiher *et al.* 1999). Comme nous l’avons vu précédemment, la masse des graines est associée à l’établissement et à la dispersion. La hauteur végétative est associée à la croissance et à la compétitivité pour accéder à la lumière. La surface foliaire spécifique (specific leaf area – SLA) est définie comme la surface d’une face d’une feuille divisée par son poids sec (Cornelissen *et al.* 2003). Cette mesure est une estimation de l’épaisseur moyenne des feuilles (Vile *et al.* 2005) et est associée aux fonctions de croissance. Plus la SLA est élevée plus les feuilles sont fines (peu denses).

1.2 PLASTICITE PHENOTYPIQUE OU DIFFERENCIATION GENETIQUE ?

Étant des organismes sessiles, les plantes doivent faire face à des pressions plus fortes menant à une adaptation locale. Par exemple, lors du passage de plages latitudinales ou altitudes basses à élevées, les espèces végétales ont tendance à s'adapter en produisant des graines plus petites, à avoir une phénologie plus précoce, à croître plus lentement et à investir davantage dans la reproduction clonale (e.g. Chapin & Chapin, 1981 ; Moles *et al.*, 2007 ; Montague, Barrett, & Eckert, 2008 ; Pilon, Santamaría, Hootsmans, & Vierssen, 2003). Les gammes de valeurs dans lesquelles les traits peuvent s'exprimer chez une espèce donnée conduisent à la production d'une infinité de phénotypes. Nous savons qu'un gradient écologique peut induire une différenciation phénotypique. Cette différenciation peut être due à la plasticité phénotypique mais aussi à la différenciation écotypique (Bakhtiari 2019). La plasticité phénotypique est la capacité d'un même génotype à exprimer différents phénotypes en réponse à des pressions environnementales (Agrawal *et al.* 2001) ; ce mécanisme est réversible lors d'une modification de l'environnement (accommodation). La différenciation écotypique est le mécanisme qui conduit à la distinction de deux génotypes produisant des phénotypes différents, chacun adapté à un environnement donné (écotype) ; ce mécanisme est irréversible pour un génotype donné, et héréditaire (adaptation) (Konieczny & Ausubel 1993).

Ainsi, l'un des grands axes de recherche des études sur les traits fonctionnels est d'arriver à identifier la part prise par la plasticité phénotypique et celle prise par la différenciation écotypique dans les valeurs de traits des espèces. Pour cela, il peut être nécessaire de passer par des cultures croisées, ou en conditions contrôlées. A titre d'exemple Bakhtiari *et al.* (2019) observent deux phénotypes selon un gradient d'altitude pour *Cardamine pratensis* et *Plantago major*. Afin de savoir s'il s'agit d'un phénomène d'adaptation écotypique ou de plasticité phénotypique, les auteurs réalisent des plantations croisées à partir de graines, inversant les altitudes par rapport aux populations mères. Les hypothèses sont résumées dans la Figure 2.

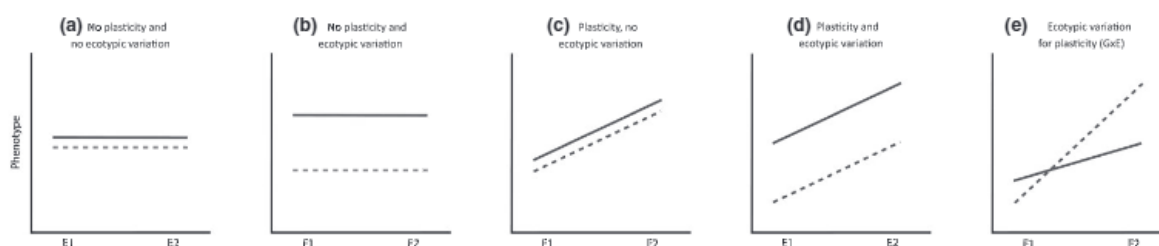


Figure 2 - Cadre théorique pour mesurer la différenciation écotypique et la plasticité phénotypique à l'aide d'expériences de transplantation. Les différents graphiques représentent tous les scénarios alternatifs. Les types de lignes représentent des écotypes

Dans leur étude, il semblerait que les traits de croissance soient expliqués par la plasticité : une basse altitude induirait une croissance plus rapide ainsi qu'une biomasse totale plus importante. Par contre, les variations de traits liés aux mécanismes de défense semblent être dus à une différenciation écotypique. Les écotypes récoltés à basse altitude sont plus concentrés en produits chimiques de défense quel que soit leur altitude de croissance. Il y a cependant une légère plasticité phénotypique sur la production de glucosinolates indoliques, molécules impliquées dans la défense contre l'herbivorie donnant un goût amer aux plantes. Cette plasticité serait liée à l'augmentation de la température. La différenciation écotypique s'expliquerait par une stratégie d'économie d'énergie, limitant la production de certaines molécules dans des milieux où les pressions d'herbivorie seraient moins fortes.

On pourrait penser qu'en milieu urbain, les pressions d'évolution peuvent paraître trop récentes pour que les espèces y soient déjà adaptées en écotypes urbains. Néanmoins, il a été montré l'apparition récente de deux écotypes chez *Crepis sancta*, différenciés par leur stratégie de dispersion (Cheptou *et al.* 2008). L'originalité de *Crepis sancta* est la production de deux types de semences ; des semences à pappus à dispersion lointaine et des semences plus lourdes et sans pappus, à faible dispersion. En contexte urbain, les semences à faible dispersion ont 1.5 fois plus de chance de s'installer que les semences à pappus. Cela s'explique par la fragmentation urbaine qui implique qu'une graine a plus de chance de tomber sur un milieu propice à son développement si elle tombe au pied de la plante mère que si elle s'en éloigne. Les traits liés aux semences étant centraux dans la transmission du patrimoine génétique, les pressions de sélection sont très fortes. En contexte urbain, la faible dispersion est très sélectionnée ce qui a conduit à l'apparition rapide (entre 7 et 12 générations) de deux écotypes. Un écotype urbain avec un rapport $\frac{\text{non dispersing seeds}}{\text{dispersing seeds}}$ élevé et un écotype rural avec ce rapport plus faible (Cheptou *et al.* 2008).

2 DESCRIPTION DU MATERIEL ET DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE DE MESURE DE TRAITS COMMUNAUTAIRES ET SPECIFIQUE *IN SITU*

2.1 SELECTION DES SITES

2.1.1 REPARTITION DES SITES SELON UN GRADIENT D'URBANISATION ET DE GESTION.

Le territoire sur lequel nous travaillons est entièrement compris dans l'Eurométropole de Strasbourg (EMS). Cet espace est situé dans le Bas-Rhin (67), regroupe 33 communes et s'étend sur 340km².

La première étape de cette étude est de définir un échantillon d'espaces herbacés permettant de répondre à notre question. Il faut donc que ces sites couvrent un gradient d'urbanisation allant de paysages forestiers à des paysages urbains. Nous excluons volontairement les contextes agricoles qui ont déjà été largement étudiés dans un gradient d'urbanisation (McDonnell et Hahs 2008) et qui peuvent s'avérer complexes pour extraire des liens de causalités entre les variables observées et les facteurs explicatifs (McDonnell *et al.* 2009).

Outre ces facteurs paysagers, nous voulons également étudier un gradient de gestion que nous assimilerons à trois catégories d'habitats ; gazon, prairie et friche. C'est trois milieux différents par l'intensité de gestion qu'il y est apporté. Le gazon est le milieu le plus géré, la végétation y est tolérante au piétinement et à la tonte et peu diversifiée. Vient ensuite la prairie, la gestion y est moins fréquente mais reste régulière. La friche est le milieu le moins géré. La grande différence entre ces milieux réside donc dans la gestion qui leur est apportée. Une prairie urbaine est un milieu intermédiaire entre gazon et friche qui nécessite une gestion peu fréquente mais régulière (Roche, 2016). En effet, outre les conditions climatiques, la gestion façonne la structure des prairies urbaines (Politi Bertoncini *et al.*, 2012). Il faut noter que la formation d'une prairie urbaine qui a subi un traumatisme (labourage, fertilisation, surpâturage, etc.) peut prendre entre quinze et vingt ans pour retrouver un cortège d'espèces typiques. Pendant ce laps de temps, une végétation à l'interface du gazon et de la prairie peut s'installer sur le site (Lehane et Muratet, 2014 ; Roche, 2016).

Pour construire cet échantillon mêlant gradient de gestion et d'urbanisation, nous avons dans un premier temps extrait l'ensemble des prairies, pelouses et bandes herbeuses de plus de 2000m² de la base de données d'occupation du sol (OCS) fournie par le Sertit 2017 (Service

régional de traitement d'image et de télédétection). Cette base de données, produite à partir de l'observation satellitaire du sol, nous a permis de pré sélectionner des potentiels sites pour notre étude en appliquant des filtres paysagers. Sous QGIS (3.1.10), nous avons écarté dans un premiers temps les sites trop proches de zones agricoles et trop humides. Nous avons également pris soin au préalable de définir un contexte paysager grossier (forestier vs urbain sur une maille de 1km²) qui sera affiné par la suite. L'objectif ici est simplement de répartir nos sites dans des contextes paysagers différents. En plus des sites référencés dans le SERTIT nous avons contacté différents acteurs afin de compléter au mieux notre échantillon. Grâce notamment à l'EMS, à l'aérodrome de Strasbourg et au Port autonome de Strasbourg (PAS), et après une validation en nous rendant sur place, nous avons réussi à échantillonner 41 sites. Après nous être rendu sur place, nous avons pu définir le type d'habitat du milieu en fonction de la structure et la composition de la végétation.

Le contexte d'urbanisation repose sur l'étude de deux bases de données. Le plan local d'urbanisme (PLU) de l'EMS fournit une description fine de l'occupation du sol incluant les sols agricoles, naturels et forestiers mais surtout une catégorisation très précise du bâti que nous avons synthétisée en six classes (Tableau 1). Nous avons regroupé tous les milieux naturels, forestiers, agricoles et « à urbaniser » en une seule classe « naturelle ». Les zones à urbaniser étant actuellement naturelle, ce choix nous semblait le plus logique.

De plus, nous avons décidé de distinguer les paysages urbains en fonction de leur usage. Pour l'habitation, nous avons distingué deux classes ; bâti bas (construction de moins de 4 étages) et bâti haut. Nous avons également distingué les équipements publics des équipements économiques et regroupé en une seule classe, les occupations du sol mixte que nous ne pouvions pas classer ailleurs car elles sont catégorisées sans distinction de l'habitation (de toutes hauteurs) et des équipements publics et privés. L'ensemble des fusions sont résumées dans le Tableau 2.

Il manque cependant l'eau. C'est pourquoi nous avons complété les données du PLU avec le Sertit afin d'extraire, sous QGIS, les polygones associés à l'eau.

Tableau 1 - Présentation des classes d'occupation du sol du plan local d'urbanisme de l'EMS

Code	Usage	Densité	Description PLU
Zones urbaines			
UAA	mixte	faible	Bâti ancien villageois traditionnel
UAB	mixte	moyenne	Bâti ancien des quartiers de Strasbourg
UB	mixte	na	Hétérogène
UCA	résidentiel	faible	Maisons individuelles
UCB	résidentiel	forte	Immeubles
UD	mixte	très forte	Grands ensembles résidentiels et grands projets
UE	équipement public	na	Equipements publics à intérêt collectif
UF	institution	na	Institutions internationales et services publics
UG	militaire	faible	Usage militaire
UX	économique	na	Usage économique
PSMV	mixte	na	Plan de sauvegarde et de mise en valeur du bâti
UY	mixte	na	Tissus urbains excluant l'habitat et/ou le commerce.
UZ	économique	na	Usage économique spécifique à Illkirch Graffenstaden
Zones à urbaniser			
IAUA	mixte	na	Urbanisation à venir
IAUB	mixte	na	Urbanisation à venir
IAUE	équipement public	na	Équipement public à intérêt collectif, urbanisation à venir
IAUx	économique	na	A venir
IAUz	économique	na	Spécifique à Illkirch Graffenstaden, à venir
IIAU	mixte	na	Urbanisation mixte à long terme
IIAUE	équipement public	na	Équipement public à intérêt collectif, urbanisation à long terme
IIAUx	économique	na	Urbanisation à long terme
Zones agricoles			
A	agronomique	faible	Intérêts agronomiques, biologiques ou économiques
Zones naturelles			
N	écologiques	faible	Zones naturelles et forestières,

Tableau 2 - Nouvelles variables paysagères créées à partir du PLU et du SERTIT

	Anciens codes	Nouveau code	Nouvelle description
Bâti bas	UAA, UAB, UCA	BB	Bâti résidentiel à faible densité
Bâti haut	UCB, UD	BH	Bâti résidentiel à forte densité
Équipement économiques	UX, UZ, UG	EE	Industries et entreprises
Équipement publics	UE, UF	EP	Ensemble d'équipement public, à intérêt collectif et d'institutions internationales
Mixte	UB, UY, PSMV	MIX	Tissus complexes sans dominance
Zones naturelles	N, A, tous les AU	N	Espaces naturels et forestiers
Eaux	Absent du PLU	EAU	Toutes les zones d'eau

La Figure 3 présente une cartographie du positionnement spatial des sites dans leurs contextes paysagers. Nous pouvons observer une hétérogénéisation du paysage au fur et à mesure que l'on s'approche du centre de l'EMS qui est majoritairement représenté par Strasbourg. Plus l'on s'approche du centre, plus l'occupation du sol est représentée par du bâti et des équipements mixtes. En périphérie, nous retrouvons des équipements publics et économiques puis en s'éloignant du centre, des milieux naturels et du bâti presque exclusivement bas. Nos sites traversent bien ce gradient selon l'axe Nord Sud alors que l'axe Est Ouest s'étale plutôt du centre urbain vers la périphérie urbaine.

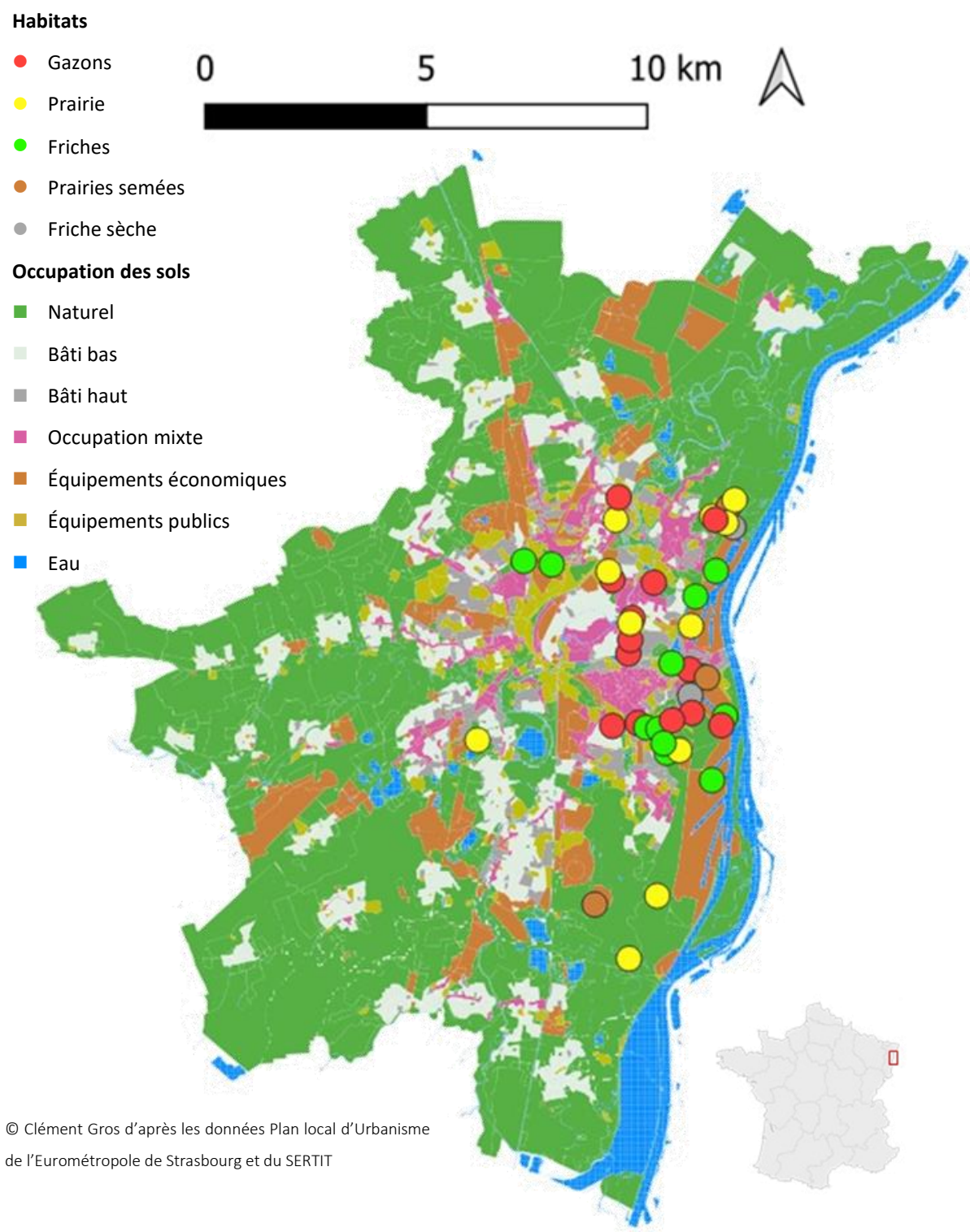
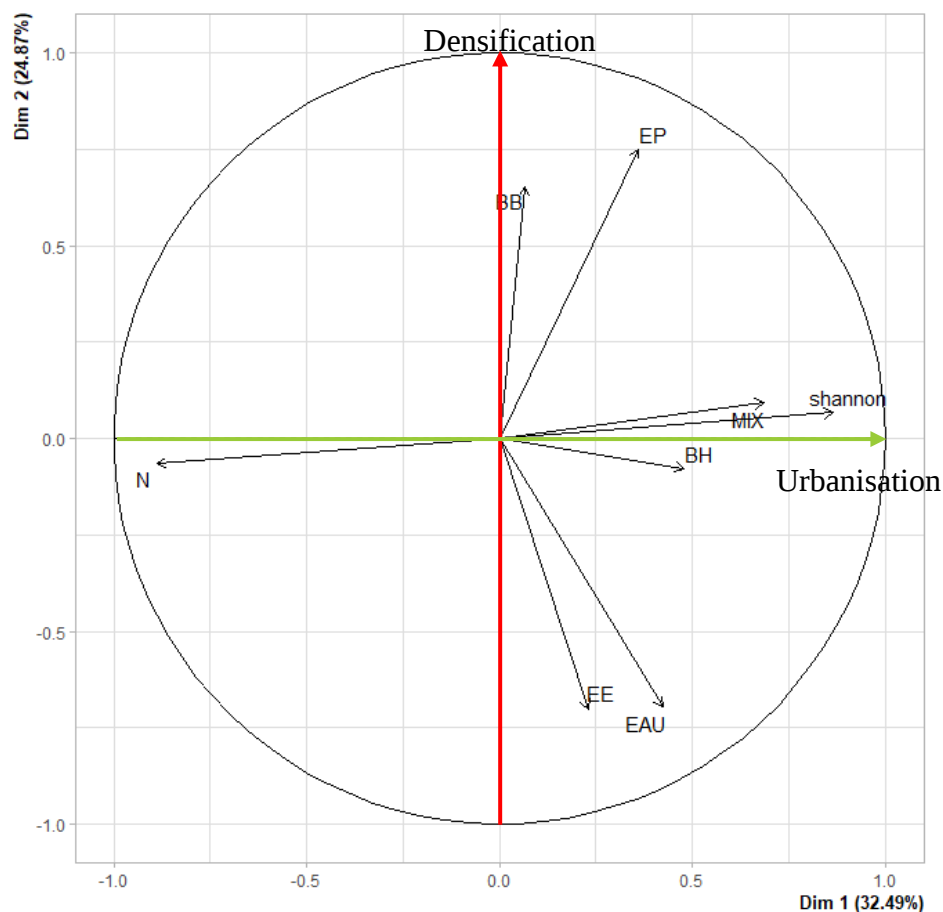


Figure 3 - Positionnement spatial des 41 sites d'étude dans leurs contextes paysagers

Afin de mieux appréhender les variables paysagères, nous travaillons dans une zone tampon de 200m autour de nos sites. Cette échelle permet d'appréhender le paysage en évitant les multicollinéarités (Schindler *et al.* 2008). Nous avons donc extrait sous QGIS la surface de chaque occupation du sol dans une zone tampon de 200m autour de tous nos sites puis sous R (R Core Team (2020) version 4.0.2,) avec le package *rgdal* (Bivand 2015), nous avons calculé la proportion représentée par chaque occupation du sol dans la surface totale de nos zones tampon. Nous avons également calculé l'indice de Shannon qui traduit l'hétérogénéité paysagère des sites en prenant en compte le nombre d'éléments du paysage ainsi que leur abondance relative (Baudry et Burel, 1999). Nous avons ainsi huit variables paysagères associées à nos sites. La dernière étape est de condenser cette information paysagère pour réduire le nombre de variables qui pourraient être corrélées. Nous avons donc réalisé une analyse en composantes principales (ACP) (Figure 4) avec le package *FactoMineR* (Husson *et al.* 2016). L'ACP permet de visualiser et d'explorer le jeu de données dans un espace multidimensionnel (Benzécri 1973). Les informations peuvent être ainsi être décorréliées en les résumant à de nouvelles variables issues des coordonnées par rapport aux axes.

Avec notre jeu de données, il est possible de distinguer deux nouvelles variables (voir Figure 4). Le premier axe de l'ACP semble distinguer les milieux naturels (N) des milieux très urbains (BH) avec une forte hétérogénéité (Shannon et MIX). Nous associerons cet axe à une variable d'urbanisation. Plus sa valeur est élevée, plus on se rapproche de milieux urbains fragmentés. Le deuxième axe de l'ACP permet de nuancer les milieux urbains. Nous passons ici, d'un paysage périurbain assez lâche avec des équipements économiques (EE) proche du Rhin (EAU) à un milieu plus dense constitué d'habitations (BB) et d'équipements publics. Cet axe sera notre variable de densification. Il est important de noter qu'outre la densification, l'usage du milieu est différent. À faible densification, l'usage est économique (lieu de travail) alors qu'à forte densification, l'usage est résidentiel et récréatif. Pour remplacer les huit variables paysagères issues du PLU et du Sertit par nos deux nouvelles, nous avons extrait les coordonnées des deux axes pour tous nos sites.



Axe urbanisation			Axe densification		
	correlation	p.value		correlation	p.value
shannon	0.8644668	3.266384e-13	EP	0.7495245	1.713092e-08
MIX	0.6846081	7.965043e-07	BB	0.6538120	3.564579e-06
BH	0.4794502	1.515350e-03	EAU	-0.6960517	4.355013e-07
EAU	0.4228817	5.876871e-03	EE	-0.7016002	3.217260e-07
EP	0.3588517	2.121996e-02			
N	-0.8879040	1.002472e-14			

Figure 4 - Résultat de l'analyse en composante principale sur les variables paysagères en haut et les corrélations associées

2.2 SELECTION DES TRAITS

Pour comprendre comment les pratiques de gestion et l'urbanisation agissent sur les traits fonctionnels de la flore, nous devons définir quels sont les traits les plus pertinents à suivre. L'identification des traits à intégrer à l'étude repose sur une étude fine de la bibliographie. L'objectif ici est d'élaborer une liste de traits dont les attributs agissent sur les trois traits de performance (croissance, reproduction et survie) et qui répondent à un gradient d'urbanisation et de gestion.

Pour mieux comprendre la relation entre les traits fonctionnels des plantes et les environnements urbains, Williams *et al* (2015) ont étudié les résultats de 29 études ayant spécifiquement examiné les traits floraux et les indicateurs de niche de la flore urbaine. Cet article est structurant pour notre analyse bibliographique puisqu'il couvre la grande majorité de ce qui a été fait du début des années 2000 au début des années 2010. Cet article est d'autant plus intéressant qu'il confronte plusieurs articles ayant étudié les mêmes traits face à un gradient d'urbanisation. Cela permet de faire ressortir la robustesse des réponses de certains traits face à l'urbanisation.

2.2.1 CROISSANCE

Le Tableau 3 résume l'analyse bibliographique des traits fonctionnels liés à la croissance.

A. Surface spécifique foliaire

Deux études évaluant les relations entre la surface spécifique foliaire et l'abondance ont souligné que les espèces les plus communes en milieux urbains ont une surface spécifique foliaire élevée (Knapp 2009 et 2010). Thompson et McCarthy (2008) ont en revanche montré qu'une SLA intermédiaire était systématiquement favorisée en milieu urbain soulignant d'ailleurs que ce trait n'est jamais étudié en incluant des variables quadratiques dans les analyses. Ce postulat est soutenu par les effets contrastés de la SLA aux filtres urbains majeurs. Les métaux lourds, les îlots de chaleur urbains et la sécheresse tendent à diminuer la SLA (Williams *et al.* 2015) alors que l'effet inverse s'observe en présence de sols riches et de fortes lumières (Grime *et al.* 1997).

Ainsi, la compréhension des effets de l'urbanisation sur la SLA nécessite d'être approfondie. Étudier l'effet croisé de l'urbanisation et de la gestion semble très pertinent dans notre étude.

B. Taille des plantes

Il ressort de notre analyse bibliographique que l'urbanisation favorise de plus grandes espèces. Il semblerait que les espèces les plus petites soient plus susceptibles de s'éteindre en milieux urbains. En étudiant la fréquence, Thompson et McCarthy (2008) ont montré que des plantes plus grandes sont également plus fréquentes dans ces milieux. Duncan *et al.* (2011) explique cette différence par la réponse positive de la hauteur des plantes aux conditions environnementales des villes, à savoir les îlots de chaleur urbains (ICU) et à la plus grande disponibilité des nutriments. De plus, un effet négatif de l'urbanisation sur la taille pourrait être

camouflé par le fait que les grandes espèces vivent en moyenne plus longtemps que les petites (Hahs *et al.*, 2009). Néanmoins, Knapp *et al.* (2009) ont montré que les petites espèces sont plus urbaines probablement parce que la flore urbaine contient plus de plantes rudérales à cycle de vie court.

La stabilité des variations de ce trait dans plusieurs études de différentes villes et son faible coût de mesure en font un trait pertinent à suivre.

C. Phénologie

Les études de l'effet de l'urbanisation sur la phénologie tendent toutes à montrer que les villes sont le moteur d'un avancement phénologique. Ceci est expliqué par une adaptation des plantes à un environnement plus chaud et plus sec (Whitlow *et al.* 1992 et Johnson *et al.* 2015) dû notamment aux ICU. Yakub (2017) a en plus montré qu'une autre adaptation à ces conditions pourrait être une augmentation de la durée de floraison chez certaines espèces pour lesquelles l'inflorescence a un ratio avantageux entre l'activité photosynthétique et la consommation en eau.

D. Type biologique et forme de vie.

Beaucoup d'études se sont penchées sur l'abondance ou le taux relatif d'extinction par rapport aux types biologiques des plantes en milieux urbains. Les classifications utilisées ne sont pas toujours les mêmes ce qui rend les interprétations difficiles. Il semblerait que les arbres et les buissons augmentent en comparaison des autres types. Ceci est expliqué par des potentielles échappées de jardin (Dolan *et al.*, 2011 ; Godefroid and Koedam, 2007). De plus, il semblerait que les géophytes soient désavantagées par l'urbanisation, à l'inverse des thérophytes (Preston, 2000 ; Williams *et al.*, 2005). Les thérophytes étant plus adaptées à des hauts niveaux de perturbation (Knapp *et al.*, 2008).

Tableau 3 - Résumé de la connaissance sur les effets de l'urbanisation sur les traits fonctionnels associés à la croissance

Traits fonctionnels étudiés	Conclusions	Articles soutenant la conclusion	Hypothèses
SLA	Favorisation d'une SLA intermédiaire	Thomson et McCarthy 2008	La SLA est positivement corrélée à la croissance, à la richesse du sol et à d'autres indicateurs de fertilité (Grime et al. 1997). Des résultats intermédiaires sont trouvés à partir d'une analyse unimodale quadratique là où d'autres études sont restées sur une relation linéaire.
	Pas de relation significative	Cochard 2019	NA
	Favorisation d'une SLA forte	Knapp 2009; Knapp 2010	Une forte SLA serait un avantage compétitif en faisant de l'ombre aux plus petites plantes. De plus, les milieux urbains sont riches en azote. Les plantes n'ont pas besoin de stocker de fortes concentrations d'azote dans leurs feuilles (Wright et al., 2005).
		Poorter et al. 2009; Ordoñez et al. 2000; Cornelissen et al. 2003; Dwyer et al. 2014; Westoby et al. 2002; Garnier et al. 2001	La SLA est augmentée dans un environnement riche en nutriment (notamment eau, azote et phosphore)
		Garnier et al. 2007; Bouchet et al. 2017	La SLA augmente dans les environnements perturbés
Taille	Les espèces plus petites sont désavantagées en milieux urbains	Duncan et al. 2011	Les patches de végétation hautes sont préférés par les humains car plus "jolis" et donc plus préservés. Les autres milieux comme les prairies "naturelles" semblent plus touchés par l'urbanisation car se sont des milieux facilement aménageables (Leach & Givnish, 1996). De plus, même si les perturbations étaient égales, les espèces plus grandes vivent plus longtemps et persisteraient donc plus longtemps dans le paysage (Duncan & Young 2000).
		Yakub 2017	Les individus plus grands seraient plus compétitifs en milieu urbain car ils ne seraient pas désavantagés par une pression de prédation, réduite en milieu urbain comparé aux milieux ruraux
		Preston 2000; Thomson et McCarthy 2008; Vallet et al. 2010; Cochard 2019	Les espèces petites sont moins compétitives en milieux urbains
		Ziska 2004	Augmentation de la concentration en CO2 et de la température en contexte urbain
		Leps et al. 2011; Siefert et al. 2014	Augmentation de la fertilisation et de la disponibilité du phosphore
Phénologie	Avancement du développement phénologie	Yakub 2017 (Faster blooming); Cochard 2019; Jochner and Menzel 2015; Mimet et al. 2009; Roetzer et al. 2000; Neil and Wu 2006; Elmore et al. 2012; Dallimer et al. 2016; Zhang et al. 2004	Adaptation à l'environnement plus chaud et plus sec du milieu urbain par rapport au milieu rural (Whitlow et al. 1992 et Johnson et al. 2015). Hypothèse soutenue par Wolfe & Tonsor (2014) et Brachi et al. (2012).
	Plus longue période entre la germination et l'apparition des fleurs	Yakub 2017	Il semblerait là aussi que ce soit une adaptation aux environnements secs et chauds. D'après Earley et al. (2009), chez <i>A. thaliana</i> , les inflorescences contribuent à environ 55% de l'activité photosynthétique de la plante pour seulement 25% environ de sa perte en eau.
Type biologique et forme de croissance	Désavantage des géophytes et avantage des thérophytes	Preston 2000, Knapp et al. 2010a; Williams et al. 2005	Exclusion compétitive par les plantes plus grandes
	Augmentation des arbres et des buissons	Aronson et al. 2007	NA
	Les espèces à rosette ou hémirosette sont moins fréquentes	Knapp et al. 2009	NA

2.2.2 REPRODUCTION

Le Tableau 4 résume les résultats de la recherche bibliographique portant sur les traits liés à la reproduction.

A. Stratégie de pollinisation

Quatre articles se sont penchés sur les stratégies de pollinisation face à l'urbanisation et ont montré un avantage des espèces anémogames par rapport aux zoogames. Ceci est expliqué par la diminution des insectes en ville. Dolan *et al.* (2017) ont eux montré une augmentation de la fréquence des espèces entomogames en ville qu'ils expliquent par l'effet de l'horticulture sur

la composition spécifique de ces milieux. Williams *et al.* (2015) soulignent un manque de données pour l'autogamie.

B. Stratégie de dispersion

Trois études ont montré que les espèces anémochores ont plus tendance à s'éteindre avec l'urbanisation. Cheptou *et al.* (2008) précise que la non-dispersion est favorisée dans ces milieux car les chances pour une semence de s'installer sont supérieures lorsque celle-ci tombe au pied de la plante mère par rapport à une semence qui se disperse sur une moyenne ou longue distance. Knapp *et al.* (2008 et 2009) nuancent ces propos en prenant en compte l'humain comme vecteur. Il montre alors que les espèces zoochores sont favorisées en milieu urbain.

C. Masse des graines.

D'après Duncan *et al.* (2011) et Cheptou *et al.* (2008), les graines lourdes sont favorisées avec l'urbanisation. Cela s'explique par la corrélation négative entre la masse de la graine et l'intensité de dispersion. Ceci est donc cohérent avec le fait que les effets barochores sont favorisées en ville. De plus, selon Westoby *et al.* (2002), les espèces avec de plus forte masse de graine sont plus performantes dans les milieux perturbés notamment par la sécheresse, une forte compétition et l'enterrement. Sachant que certaines de ces conditions sont présentes en milieux urbains, cela explique les conclusions de Duncan *et al.*

Tableau 4 - Résumé de la connaissance sur les effets de l'urbanisation sur les traits fonctionnels associés à la reproduction

Traits fonctionnels étudiés	Conclusions	Articles soutenant la conclusion	Hypothèses
Stratégie de pollinisation	Avantage des espèces anémogames et désavantage des zoogames	Knapp <i>et al.</i> 2008, 2010; Sodhi <i>et al.</i> 2008; Lososová <i>et al.</i> 2006	Plus la distance couverte est grande, plus les effets de la fragmentation sont contrés.
Stratégie de dispersion	Les espèces anémochores sont plus enclin à s'éteindre localement	Knapp <i>et al.</i> 2010; Williams <i>et al.</i> , 2005; Sodhi <i>et al.</i> 2008	L'hétérogénéité du milieu urbain réduit les chances d'installation des graines.
	Les espèces anémochores et zoochores (humain compris) sont plus fréquentes en milieu urbain	Knapp 2008 et 2009	Ces modes de dispersion permettent de couvrir de large zone, limitant ainsi théoriquement les effets de la fragmentation. La multiplication des vecteurs de dispersion semblent élargir la fréquence de ces espèces. Utilisation des humains (voir même des voitures) comme vecteurs (Hodkinson & Thompson 1997, von der Lippe & Kowarik 2007, 2008)
	Favorisation de la non dispersion	Cheptou 2008	La fragmentation extrême des habitats urbains limite grandement les chances qu'une graine dispersée atterrisse dans un milieu favorable à la germination comparé à celle qui reste près des pieds mère.
Masse des graines	Les espèces à graines lourdes sont favorisées	Duncan <i>et al.</i> 2011; Cheptou 2008	Conséquence de l'effet de l'urbanisation sur la taille. Et de l'avantage de la non dispersion.

2.2.3 SURVIE

Le seul trait lié spécifiquement à la survie étudié en milieu urbain est la durée de vie (Tableau 5). Le reste de la bibliographie porte sur des stratégies et des indicateurs de niche. Il semblerait que l'urbanisation tend à diminuer la durée de vie des plantes (Hill *et al.* 2002 ; Leps *et al.* 2001 ; Bouchet *et al.* 2017). Hill *et al.* mettent en cause la perturbation des villes et la fertilité des sols alors que les deux autres études soulèvent un potentiel effet de gestion.

Tableau 5 - Résumé de la connaissance sur les effets de l'urbanisation sur les traits fonctionnels associés à la survie

Traits fonctionnels étudiés	Conclusions	Articles soutenant la conclusion	Hypothèses
Durée de vie	Durée de vie plus courte	Hill et al. 2002	Les fortes perturbations des villes et la fertilité du sol seraient en cause.
		Leps et al. 2001; Bouchet et al. 2017	Effet de gestion

2.2.4 CHOIX DES TRAITS

Pour cette étude, nous avons choisi d'étudier six traits continus. Premièrement, la **surface spécifique foliaire**. Il s'agit d'un trait emblématique qui reste peu étudié dans notre contexte. Nous avons cependant des pistes intéressantes pour l'appréhender avec notamment le fait qu'une SLA intermédiaire puisse être favorisée par l'urbanisation. Ce trait peut également être un très bon indicateur de milieux perturbés comme nous l'avons vu précédemment. Enfin, avec une perspective plus pratique, sa mesure est peu coûteuse puisqu'elle ne nécessite pas de manipulation complexe.

Deuxièmement, nous avons choisi d'intégrer la hauteur des plantes à notre étude. Nous avons, cependant choisi de faire la distinction entre **hauteur végétative** et **hauteur reproductrice**. Bien qu'il soit difficile de différencier les deux chez certaines espèces prairiales qui présentent des formes de vie et des morphologies différentes (Garnier et Navas 2013), nous avons pris le parti d'élaborer des protocoles spécifiques pour permettre leur mesure. Ce choix a été motivé par le fait qu'il s'agit de deux attributs traduisant deux fonctions très différentes que nous souhaitons étudier. La longueur étirée végétative est un attribut associé aux fonctions de croissance (LEV) alors que la longueur étirée reproductrice est associée aux fonctions de dispersion.

Enfin, nous avons choisi d'étudier aussi des traits floraux qui nous semblait manquer à nos variables. Ces traits sont probablement les plus complexes des quatre à appréhender à cause de la diversité de formes de fleurs et d'inflorescences qui existent. Pour cela, nous avons élaboré des protocoles différents selon les familles des espèces étudiées. Pour les astéracées, nous nous

intéressons **au diamètre de l'inflorescence**, pour les poacées et le plantain, à la **longueur de l'inflorescence** et pour les fabacées, **au nombre de fleurs par inflorescence** ainsi que leur taille. Et enfin, pour toutes les espèces à fleurs simple, nous mesurerons le **diamètre de la corolle**.

Ainsi, en plus des six variables environnementales énoncées précédemment, nous aurons 7 variables fonctionnelles continues (une foliaire, deux de longueurs et quatre florales).

2.3 SELECTION DES ESPECES

Pour réaliser les mesures des traits, nous sommes forcés de nous concentrer sur une liste réduite, sans quoi, il serait impossible de finir les mesures dans le temps imparti.

Pour sélectionner les espèces de cette liste, nous avons travaillé avec les données issues du programme Vigie-Flore, un des observatoires de la biodiversité du programme de science participative Vigie-Nature (Muséum national d'Histoire naturelle). Vigie-Flore propose une base de données sur les abondances des espèces végétales les plus communes de France. En filtrant les données Vigie-Nature par rapport aux codes Corine Biotope des milieux qui nous intéressent (prairie mésophiles, parcs et grands jardins, friches et terrains vagues). Avec le jeu de données restant, nous avons pu trier les espèces par fréquence croissante. Nous avons ensuite joint aux espèces, leurs stratégies de pollinisation et de dissémination à partir des données de BaseFlor.

Nous avons ensuite constitué notre liste d'espèces en tachant d'inclure plusieurs poacées, fabacées et astéracées car ces familles sont très représentées dans nos milieux et parce que nous avons choisi des traits spécifiques à ces familles. Nous avons également écarté les espèces pour lesquels les traits sont trop complexes à mesurer. Comme l'achillée millefeuille (*Achillea millefolium*) ou la carotte (*Daucus carota*) qui présentent des feuilles trop découpées rendant des mesures de surface foliaire précises impossible. Cela implique donc la suppression des espèces trop précoces qui seront déjà à l'état de fruit voir sec en Juin comme la capselle (*Capsella bursa-pastoris*), les renoncules ou la véronique de Perse (*Veronica persica*). De plus, nous avons écarté les espèces facilement hybridables comme *Lolium perenne* ou difficile à identifier à l'espèce comme les *Taraxacum*.

Bien que les longueurs étirées soient difficiles appréhender pour les espèces rampantes, nous avons choisi de conserver le trèfle rampant (*Trifolium repens*) et la potentille rampante

(*Potentilla reptans*) car ce sont des morphologies communes dans les milieux urbains et en particulier dans les gazons.

Les espèces retenues sont les suivantes :

Tableau 6 - Listes des espèces sur lesquelles sont mesurés les traits

Espèces	Famille	Stratégie de Pollinisation	Stratégie de Dispersion
<i>Erigeron annuus</i>	Asteraceae	Entomogame	Anémochore
<i>Hypochaeris radicata</i>	Asteraceae	Entomogame	Anémochore
<i>Convolvulus arvensis</i>	Convolvulaceae	Entomogame	Barochore
<i>Lotus corniculatus</i>	Fabaceae	Entomogame	Barochore
<i>Medicago lupulina</i>	Fabaceae	Entomogame	Barochore
<i>Trifolium pratense</i>	Fabaceae	Entomogame	Epizoochore
<i>Trifolium repens</i>	Fabaceae	Entomogame	Epizoochore
<i>Hypericum perforatum</i>	Hypericaceae	Entomogame	Anémochore
<i>Plantago lanceolata</i>	Plantaginaceae	Entomogame	Barochore
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Poaceae	Anémogame	Epizoochore
<i>Dactylis glomerata</i>	Poaceae	Anémogame	Epizoochore
<i>Potentilla reptans</i>	Rosaceae	Entomogame	Barochore

2.4 PROTOCOLE DE MESURE DE TRAITS

Il existe plusieurs protocoles standardisés pour mesurer de nombreux traits sur les végétaux. On peut notamment citer les quatre principaux avec en 1993, celui d'Hendry et Grime qui se sont concentrés sur les mesures en conditions contrôlées. En 2003, le manuel de Cornelissen *et al.* qui sera complété et amélioré en 2013 par Pérez-Harguindeguy *et al.* contenant ainsi des protocoles sur 88 traits en conditions réelles. Entre temps, Knevel *et al.* proposent en 2005 un protocole créé pour la mise en place de la base de données LEDA indiquant les mesures de 20 traits. Pour cette étude, nous sommes principalement basé sur le protocole de Pérez-Harguindeguy *et al.* : *New handbook for standardised measurement of plant functional traits*

worldwide. Le protocole que nous avons réalisé se divise en deux parties. La première expose les méthodes à appliquer sur le terrain avec notamment la mise en place d'un inventaire dans 15 quadrats de 1m² regroupé par 5 en lignes. La deuxième partie du protocole s'attarde sur les mesures des traits sélectionnés précédemment (cf. 2.2) avec une partie de mesure *in situ* et une partie en laboratoire. La création de ce protocole a abouti à la rédaction d'un manuel de terrain standardisé spécialement développé pour le projet Evol' Ville et qui sera utilisé pour les 3 années (annexe 2).

2.4.1 SUR LE TERRAIN

Relevés floristiques avec indication de fréquences et de phénologie

Placer 15 quadrats de 1m² par espace herbacé regroupés en 3 lignes de 5x1m² distantes de 4 mètres entre elles et situées environ au centre du site (ou pour les grands sites, à au moins 20 mètres de la bordure). En fonction de la forme du site, il est possible soit de les placer en lignes, soit de les disposer en croix. 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. Chaque site est noté par un code chiffré à reporter sur les fiches terrains et les prélèvements avec la date de relevé et le nom d'observateur.

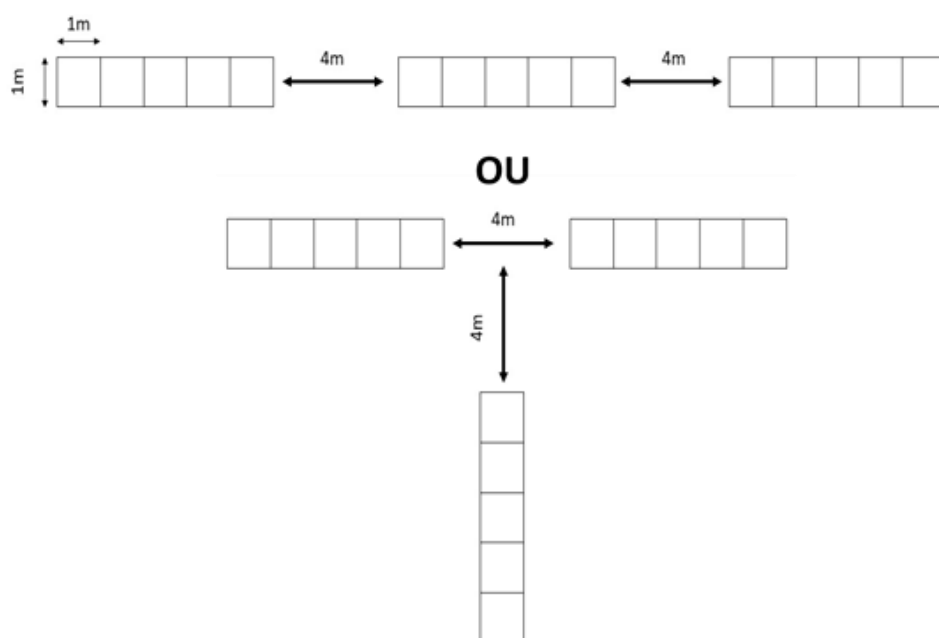


Figure 5 - Schéma de la disposition des quadrats pour l'inventaire

Mesures des traits morphologiques

Les traits ont été mesurés sur la liste développée dans la partie 2.3 ci-dessus.

1. Pour chaque site, choisir cinq espèces du tableau. Les espèces choisies doivent être largement présentes sur le site. Tacher, selon les espèces présentes sur le site, de sélectionner à la fois des espèces ubiquistes et des espèces plus exigeantes. Si *Trifolium pratense* et *Trifolium repens* ou *Lotus corniculatus* et *Medicago lupulina* sont présents sur le site, choisir une des deux espèces.
2. Pour chaque espèce choisie, prélever 10 individus. Les individus doivent être en fleurs – environ de la taille maximale de ce qui est observable dans la prairie – en bonne santé – pas de signe d’herbivorie, de cassure ou de maladie – et être le plus exposés possible à la lumière.
3. Pour chacun des 10 individus, noter sur la fiche et les prélèvements le code formé du code de la prairie, la date, les initiales de l’espèce et le numéro d’individu (par exemple 57-280520-PL-1 : prairie 57, le 28 mai 2020, *Plantago lanceolata*, individu 1) :

Plante entière – Mesurer (au cm près) la longueur étirée végétative (LEV) et la longueur étirée de reproduction (LER) et compléter la grille de terrain (Annexe 3).

- **LEV** : Elle est définie comme la longueur maximale d’un individu étiré (sans tenir compte de la position dans l’espace de l’individu) entre son point d’attache principal et le nœud de ses derniers tissus photosynthétiques principaux. Les bractées ne seront alors pas considérées comme des tissus photosynthétiques principaux.
- **LER** : Elle est définie comme la longueur maximale d’un individu étiré (sans tenir compte de la position dans l’espace de l’individu) entre son point d’attache principal et ses derniers tissus reproducteur (fleurs).

Feuille – Prélever une partie de l’individu à mi-hauteur contenant 2 feuilles matures, bien exposées et en bonne santé. Les feuilles se conserveront mieux en étant encore attachées à une tige si possible. Conserver les feuilles ou les rameaux dans un essuie tout humide et stocké dans un sachet plastique étanche à ZIP.

Fleurs – Pour les poacées et le plantain, mesurer la longueur de l’inflorescence (à 1mm près). Pour les fabacées, compter le nombre de fleurs sur une inflorescence et mesurer la longueur

d'une fleur (à 0.1mm près). Pour les astéracées, mesurer le diamètre de l'inflorescence (à 0.1mm près). Pour les autres espèces, mesurer la longueur d'un pétale (voir Tableau 7).

Tableau 7 - Résumé des mesures florales selon les espèces

Espèces	Famille	Traits floral mesuré
<i>Bellis perennis</i>	Asteraceae	Diamètre de l'inflorescence
<i>Erigeron annuus</i>	Asteraceae	Diamètre de l'inflorescence
<i>Hypochaeris radicata</i>	Asteraceae	Diamètre de l'inflorescence
<i>Convolvulus arvensis</i>	Convolvulaceae	Diamètre d'une fleur
<i>Lotus corniculatus</i>	Fabaceae	Taille de l'inflorescence
<i>Medicago lupulina</i>	Fabaceae	Taille de l'inflorescence
<i>Trifolium pratense</i>	Fabaceae	Taille de l'inflorescence
<i>Trifolium repens</i>	Fabaceae	Taille de l'inflorescence
<i>Hypericum perforatum</i>	Hypericaceae	Diamètre d'une fleur
<i>Plantago lanceolata</i>	Plantaginaceae	Longueur de l'inflorescence
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Poaceae	Longueur de l'inflorescence
<i>Dactylis glomerata</i>	Poaceae	Longueur de l'inflorescence
<i>Potentilla reptans</i>	Rosaceae	Diamètre d'une fleur

2.4.2 EN LABORATOIRE

Surface spécifique foliaire

Prise de vue - La mesure de surface doit se faire dans les 24h après le prélèvement. Étaler et aplatir la feuille sur une feuille de papier blanche, elle-même placée sur un support parfaitement horizontal (utiliser un niveau à bulle). Placer une échelle de 10 cm à côté de la feuille. L'appareil photo doit être placé au-dessus de la feuille, lui aussi parfaitement horizontal. Prendre une photo dans le noir avec le flash pour limiter au maximum les ombres. Tant que les feuilles ne sont pas trop proches les unes des autres, il est possible de prendre plusieurs feuilles sur une même photographie si celles-ci sont bien identifiées.

Traitement imageJ - Sur un ordinateur, ouvrir la photo dans le logiciel imageJ. Calibrer l'échelle en tirant un trait de 10cm avec  sur votre échelle. Définir la longueur du trait (Analyze → Set Scale) (annexe 3.1 du protocole standardisé). Passer l'image en noir et blanc (Image → Colours → Split Channels). Trois images sont proposées, continuer les traitements avec l'image « Blue 33.3% ». Contraster au maximum l'image (Image → Adjust → Threshold) en déplaçant les deux curseurs pour réduire la gamme de couleur (annexe 3.2 du protocole standardisé). Depuis l'onglet Analyse (→ Tools → ROI Manager) et l'outil  entrer les surfaces de chaque feuille avec l'option add it et en identifiant la feuille selon le code déjà fourni

précédemment et terminé par F1 ou F2 (feuille 1 et feuille 2). En cliquant sur l'onglet mesure, vous obtiendrez un tableau avec toutes les surfaces.

Séchage – Placer séparément les feuilles de chaque individu dans du papier filtre qui reprendra le code du relevé auquel il sera ajouté 1 ou 2. (par exemple 57-280520-PL-1-1 : prairie 57, le 28 mai 2020, *Plantago lanceolata*, individu 1, feuille 1). Mettre les enveloppes en étuve à 80°C pendant 48h.

Pesée – Peser les feuilles sèches sur une balance avec une précision à 0.0001g. Le calcul de la surface spécifique foliaire correspond à la surface fraîche obtenue avec imageJ divisé par le poids sec.

2.5 METHODE D'ANALYSE STATISTIQUE

Afin de tester l'effet de l'urbanisation sur les diversités taxonomiques et fonctionnelles, nous avons choisi de réaliser des régressions linéaires sur R (R Core Team (2020) version 4.0.2) avec les packages *vegan* (Oksanen *et al.* 2007), *FacotMineR* (Husson 2016), *corrplot* (Wei *et al.* 2017) et *car* (Fox *et al.* 2007). Le principe de ce type de modèle est d'extraire le lien entre des variables explicatives et des variables à expliquer en étudiant leurs régressions. Pour chaque modèle, nous avons testé la normalité des résidus (R-Fonction `shapiro.test()`) au risque d'erreur de 5%. La significativité des résultats a été testée par une anova (R-Fonction `Anova()`, package *car*). En amont de ces analyses nous avons étudié la normalité des variables, réalisé des transformations lorsque cela s'avérait nécessaire pour s'approcher d'une distribution normale et nous avons évalué les corrélations entre variables pour vérifier leur indépendance (R-fonction `corrplot()`).

Les variables explicatives :

Les variables explicatives sont l'intensité de gestion (gazon, prairie, friche) et les coordonnées des sites sur les deux axes de l'ACP paysagère : l'urbanisation et la densification du bâti. Nous avons ajouté la surface, la latitude et la longitude des sites. Nous supposons que l'effet de la gestion peut être dépendant des gradients d'urbanisation et de densification, nous avons donc ajouté deux effets croisés, entre l'urbanisation et l'habitat et entre la densification et l'habitat. Nous avons écarté la friche sèche et les prairies semées de ces analyses trop peu représentées pour être intégrées aux modèles. La surface qui présente une répartition asymétrique tirée vers 0 a été passée en log pour s'approcher d'une répartition gaussienne.

Pour que les variables soient comparables entre elles, nous les avons, dans un premier temps, centrées puis réduites de manière à ce que les différences d'unités soient lissées.

Les variables à expliquer :

A. Niveau taxonomique :

Ici, nous tachons d'expliquer l'indice de Shannon, d'équitabilité et la richesse spécifique. Nous avons observé une forte corrélation ($\rho = 0.97$) entre l'indice de Shannon et la richesse spécifique. Nous avons donc choisi d'écarter l'indice de Shannon.

Nous avons réalisé une régression linéaire (R-fonction `lm()`) pour tester l'effet des variables explicatives sur la richesse spécifique et l'équitabilité des communautés végétales.

B. Niveau fonctionnel :

À l'échelle de la communauté :

Pour étudier les traits au niveau communautaire, nous avons calculé les valeurs moyennes de chaque trait (surface spécifique foliaire, les longueurs végétatives et reproductives et les traits floraux) pour chaque site. On parle alors de *community weight mean* (CWM). La CWM se calcule en moyennant les valeurs de trait de chaque espèce pondérée par leur fréquence dans la communauté (Whittaker *et al.* 1967). Il nous a fallu transformer les CWM pour la taille des inflorescences de fabacées et de poacées en appliquant une fonction logarithmique. Les longueurs étirées végétative et reproductrice étant très corrélées ($\rho = 0.82$), nous ne garderons que le LER pour la suite des analyses car elle ne présente pas beaucoup de valeurs à zéro contrairement à la LEV. Nous avons ensuite appliqué un modèle mixte (`lme()`) afin d'expliquer les variations des traits moyens en fonction d'effets fixes que sont les variables explicatives et d'un effet aléatoire qui est le site.

À l'échelle de l'espèce :

Afin d'évaluer les effets locaux et paysagers sur les variations intraspécifiques des traits, nous avons analysé les attributs de traits mesurés à l'échelle de l'individu qui sont la surface spécifique foliaire, les longueurs étirées végétatives et reproductives et les traits floraux. La LEV et la LER présentaient des distributions asymétriques qui tiraient vers 0. Nous avons donc appliqué une fonction logarithmique dessus. En testant la corrélation des variables nous avons à nouveau retrouvé une corrélation forte entre LEV et LER. Nous n'avons donc gardé que la

LER pour la suite des analyses. Nous avons ensuite soumis nos données à un modèle mixte (R-Fonction lme()) afin d'expliquer les variations intraspécifiques des traits en fonction d'effets fixes que sont les variables explicatives et d'un effet *aléatoire* qui est l'espèce.

3 RESULTATS

Au terme de la campagne de terrain, nous avons pu réaliser les inventaires sur 41 sites, les mesures de surface foliaire et de longueur sur 24 (9 gazons, 7 prairies et 8 friches) et les mesures florales sur 10 sites (3 gazons, 4 prairies et 3 friches). Au total, sur les 15 quadrats des 41 sites, 6304 individus répartis dans 221 espèces ont été observés, la SLA et les longueurs étirées ont été mesurées sur 1534 individus (soit 3068 feuilles) et les traits floraux sur 367 individus.

Le Tableau 8 présente la répartition des mesures de SLA et de longueurs étirées sur par espèce.

Tableau 8 - Résumé des mesures florales selon les espèces

Espèces	Occurrence	Gazons	Prairies	Friches
<i>Plantago lanceolata</i>	21	9	4	8
<i>Dactylis glomerata</i>	9	0	3	6
<i>Trifolium pratense</i>	9	2	4	3
<i>Arrhenatherum elatius</i>	7	0	4	3
<i>Bellis perennis</i>	7	7	0	0
<i>Erigeron annuus</i>	6	0	2	4
<i>Hypericum perforatum</i>	6	0	0	6
<i>Lotus corniculatus</i>	6	2	1	2
<i>Potentilla reptans</i>	6	3	1	2
<i>Convolvulus arvensis</i>	5	2	2	1
<i>Medicago lupulina</i>	4	3	0	1
<i>Trifolium repens</i>	4	4	0	0
<i>Hypochaeris radicata</i>	2	2	0	0

3.1 NIVEAU TAXONOMIQUE

La richesse spécifique augmente avec la surface du site, les friches et les prairies ont une richesse spécifique significativement supérieure aux gazons (Figure 6) L'équitabilité ne semble par contre n'être affectée par aucune des variables environnementales étudiées.

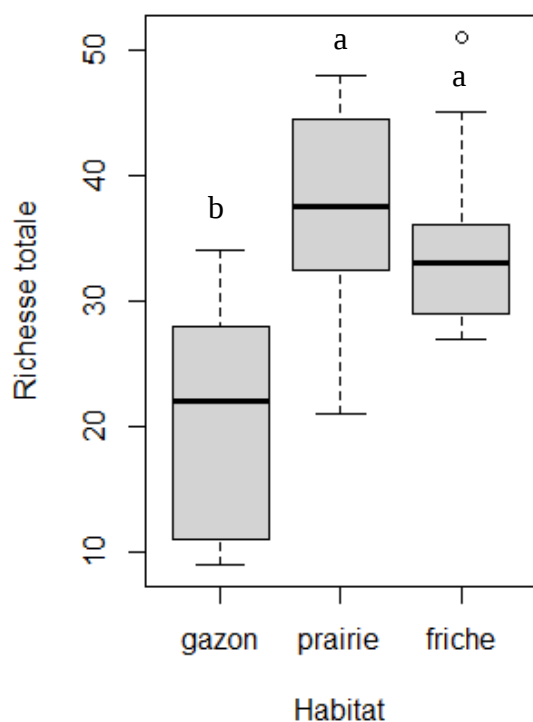


Figure 6 - Richesse spécifique en fonction du type de site

3.2 NIVEAU FONCTIONNEL

Au niveau communautaire :

La SLA est influencée négativement par la densification (Figure 7). La longueur étirée de reproduction est significativement influencée par la gestion. Une gestion faible diminue la LER (Figure 9). Enfin, pour sur l'ensemble des CWM des traits floraux, la seule relation mise en évidence est entre la latitude et le diamètre des fleurs (Figure 8)

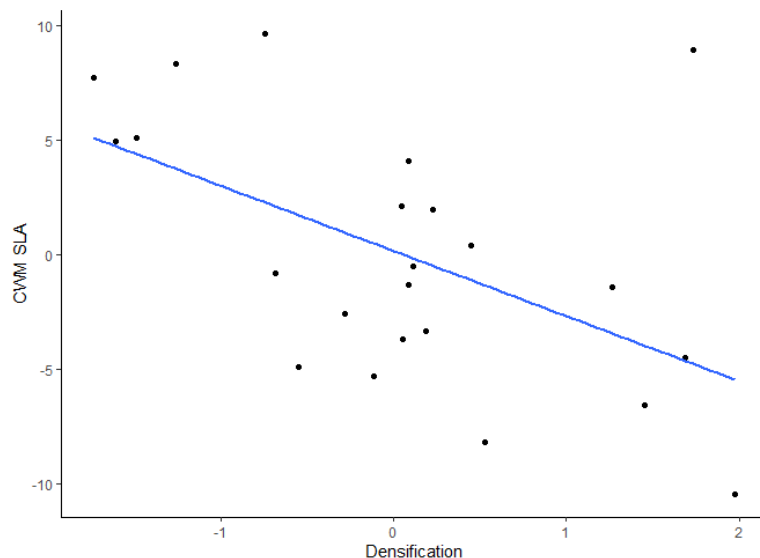


Figure 7 - Régression linéaire de la densification sur la SLA

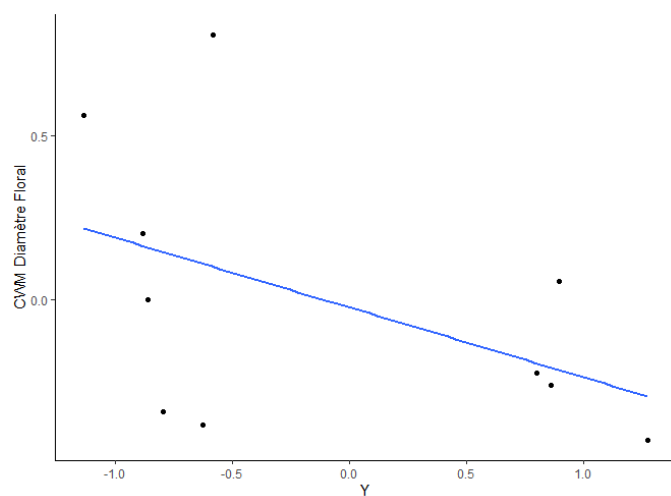


Figure 8 - Régression linéaire de la latitude sur le diamètre floral

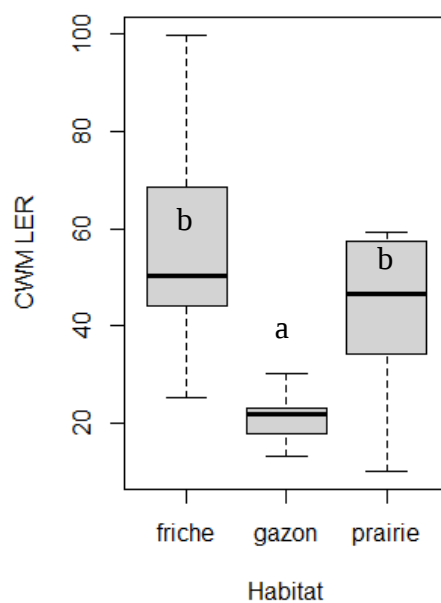


Figure 9 - Boxplot montrant l'influence de la gestion sur la LER

Au niveau de l'espèce :

Longueur étirée reproductrice :

Nous observons un effet simple de la surface, de l'habitat et de l'urbanisation ainsi qu'un effet croisé de l'urbanisation et de la densification avec l'habitat sur la longueur étirée de reproduction (Tableau 9).

Tableau 9 - Résultats du modèle linéaire sur la LER ($\alpha = 0.05$)

	value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	3.0058941	0.14528377	855	20.689813	0.0000
LogArea	-0.0825034	0.03954050	855	-2.086553	0.0372
habitatprairie	0.0254499	0.06394984	855	0.397966	0.6908
habitatfriche	0.4264191	0.04817390	855	8.851664	0.0000
urbanisation	-0.0347779	0.03588299	855	-0.969202	0.3327
Densification	-0.0401125	0.03661591	855	-1.095494	0.2736
X	0.0351373	0.02328686	855	1.508890	0.1317
Y	-0.0056440	0.02258102	855	-0.249944	0.8027
habitatprairie:Urbanisation	-0.4255583	0.07246419	855	-5.872671	0.0000
habitatfriche:Urbanisation	0.1333851	0.06821328	855	1.955413	0.0509
habitatprairie:Densification	-0.1011692	0.05024676	855	-2.013447	0.0444
habitatfriche:Densification	0.0326694	0.04320300	855	0.756184	0.4497

Plus les sites sont grands, urbains et gérés plus les parties reproductrices des plantes sont basses. Néanmoins, les effets de l'urbanisation et de la densification sont dépendants du type de gestion. L'urbanisation a un effet négatif sur la hauteur qui est surtout sensible dans les prairies, très peu dans les gazons et les friches (voir Figure 10 et Figure 11). Nous pouvons également observer l'effet négatif de la densification sur les prairies et les gazons mais non significatif pour les friches.

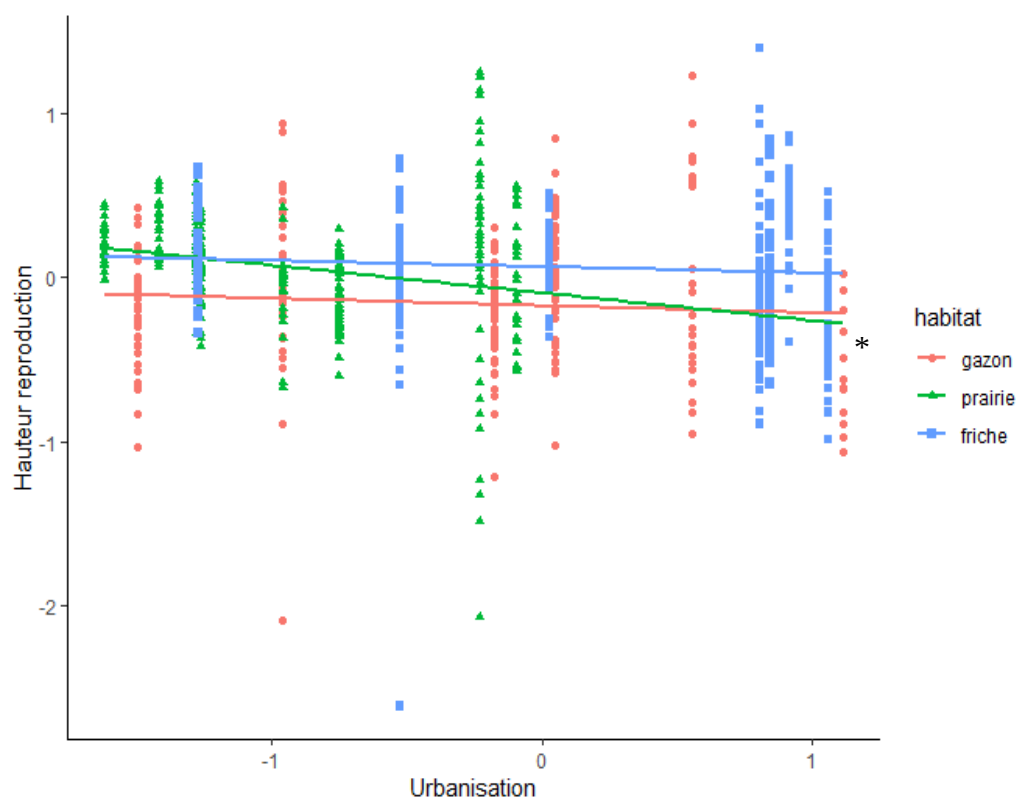


Figure 10 - Graphique illustrant les régressions linéaires de l'effet croisé entre l'habitat et l'urbanisation sur la LER ($\alpha = 0.05$)

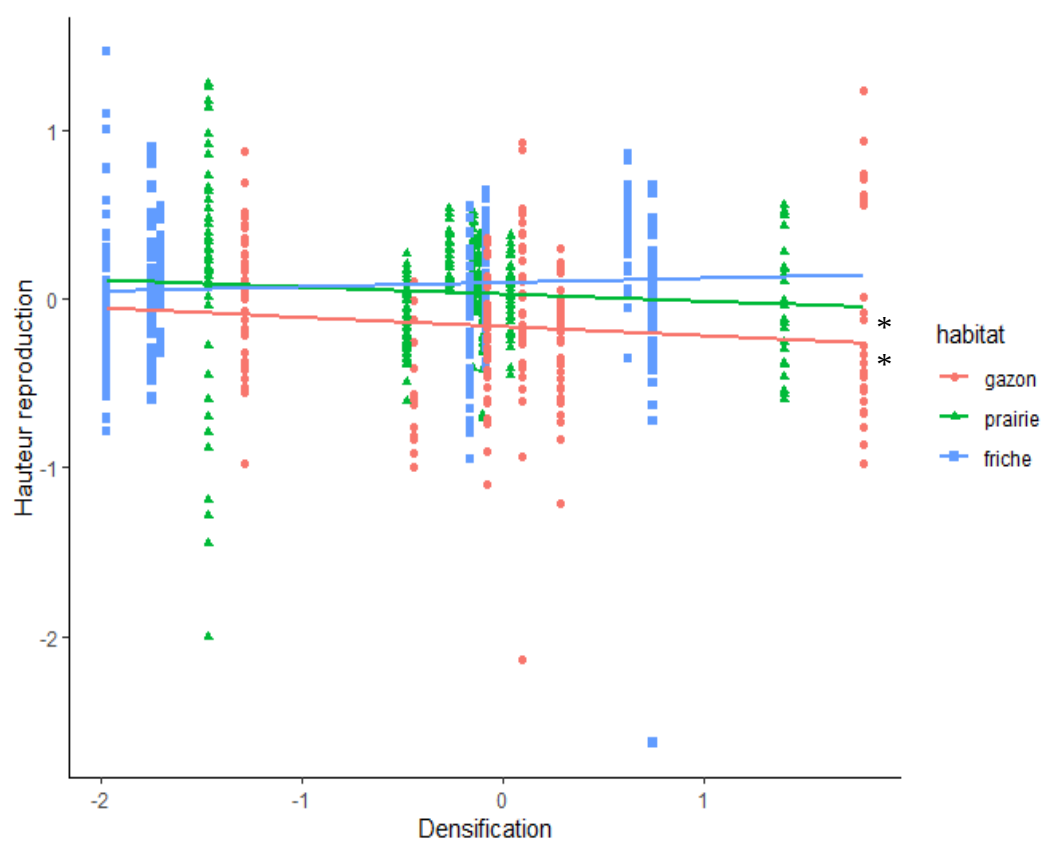


Figure 11 - Graphique illustrant les régressions linéaires de l'effet croisé entre l'habitat et la densification sur la LER ($\alpha = 0.05$)

Surface spécifique foliaire :

Nous observons des effets simples de la surface, de l'habitat, de l'urbanisation, de la densification et de la longitude ainsi que des effets croisés de l'urbanisation et de la densification avec l'habitat (Tableau 10).

Tableau 10 - Résultats du modèle linéaire sur la SLA ($\alpha = 0.05$)

	value	Std.Error	DF	t-value	p-value
(Intercept)	3536.907	6888.534	1286	0.513448	0.6077
surface	25.019	3.467	1286	7.216196	0.0000
type_milieugazon	18.818	5.689	1286	3.307951	0.0010
type_milieuprairie	-4.943	9.795	1286	-0.504679	0.6139
urbanisation	4.265	3.421	1286	1.246592	0.2128
densification	-15.342	2.996	1286	-5.120684	0.0000
x	0.007	0.002	1286	4.469436	0.0000
Y	-0.002	0.001	1286	-1.642841	0.1007
type_milieugazon:urbanisation	8.685	4.333	1286	2.004483	0.0452
type_milieuprairie:urbanisation	-7.220	6.514	1286	-1.108342	0.2679
type_milieugazon:densification	-8.090	3.113	1286	-2.598657	0.0095
type_milieuprairie:densification	5.873	4.510	1286	1.302293	0.1930

D'après ces résultats, l'épaisseur des feuilles diminue avec la taille des sites et le degré d'urbanisation. A l'inverse, elle augmente avec la densification et une gestion faible. Enfin, plus les sites sont à l'Est, plus la SLA augmente (et donc l'épaisseur diminue).

Les effets positifs de l'urbanisation et négatif de la densification sont surtout sensibles dans les gazons, ils ne ressortent que faiblement dans les friches et pas dans les prairies (Figure 12 et Figure 13).

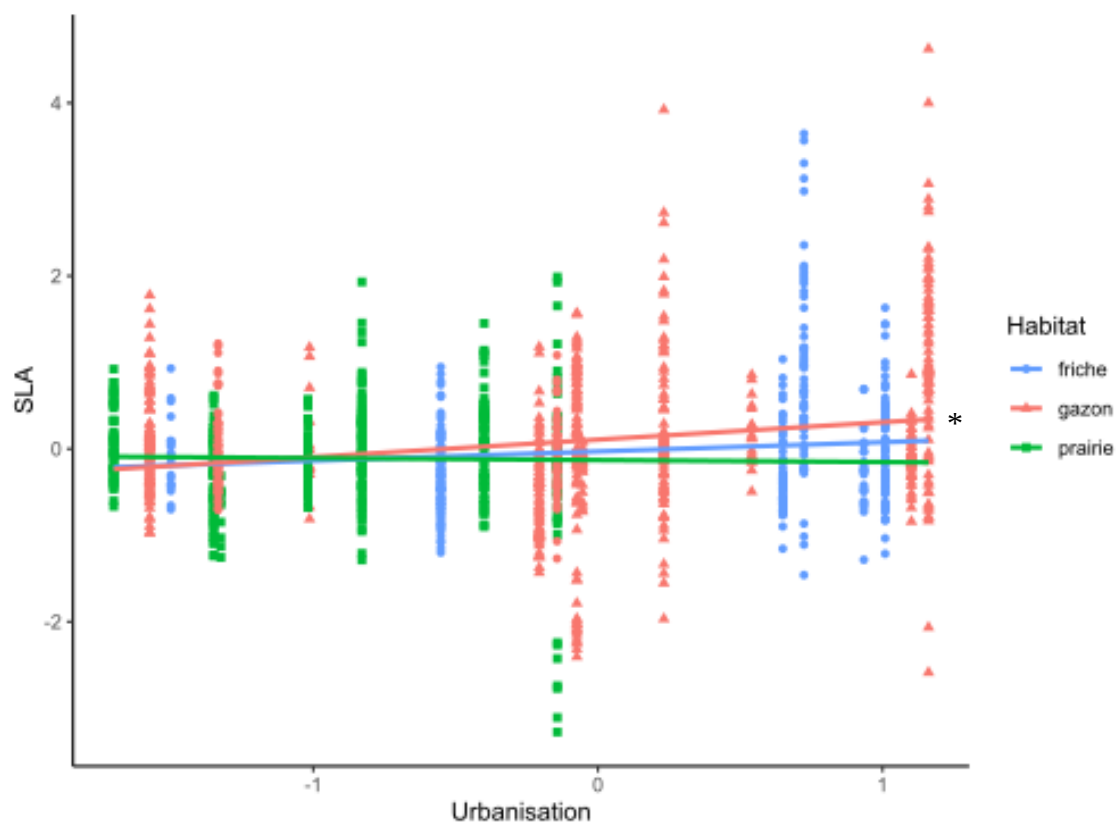


Figure 12 - Graphique illustrant les régressions linéaires de l'effet croisé entre l'habitat et l'urbanisation sur la SLA ($\alpha = 0.05$)

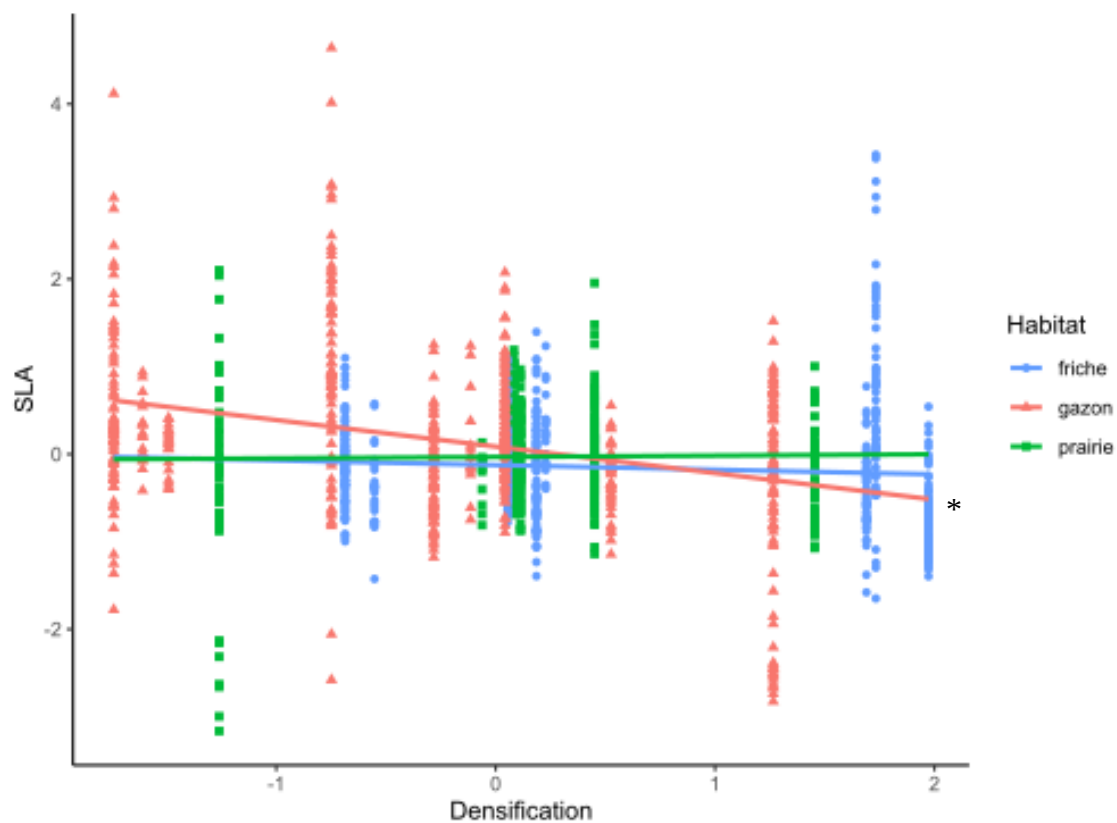


Figure 13 - Graphique illustrant les régressions linéaires de l'effet croisé entre l'habitat et la densification sur la SLA ($\alpha = 0.05$)

Toujours au niveau intraspécifique, les résultats sur les traits floraux sont présentés dans le Tableau 11. Nous n'avons pas suffisamment de mesures pour étudier l'effet croisé de l'urbanisation et de la densification avec l'habitat. Nous observons que les effets simples de la surface, l'habitat, l'urbanisation, la densification et les coordonnées X et Y sont significatives sur les diamètres des fleurs. La surface et la densification ont un effet positif sur cet attribut au même titre qu'une forte gestion (les gestions moyennes et faibles étant en revanche non significatives). Pour la taille de l'inflorescence des fabacées, nous observons un effet négatif de la surface et de la coordonnée X, le reste des variables explicatives étant non significatives.

Tableau 11 - Résultats des modèles linéaires sur les attributs floraux ($\alpha = 0.05$)

Variables explicatives		Fleurs		Inflorescences Fabacées	
		Effet sur la variables à expliquer	p value	Effet sur la variables à expliquer	p value
Effets simple	Surface (log)	+	0,005	-	< 0,001
	Habitat				
	Gazon	+	< 0,001	NS	0,069
	Prairie	NS	0,614	NS	0,069
	Friche	NS	0,546	NS	0,069
	Urbanisation	-	< 0,001	NS	0,325
	Densification	+	0,0144	na	na
	X	-	< 0,001	-	< 0,001
	Y	-	< 0,001	NS	0,158
Variables explicatives		Inflorescences Poacées		Inflorescences Asteracées	
		Effet sur la variables à expliquer	p value	Effet sur la variables à expliquer	p value
Effets simple	Surface (log)	NS	0,4	NS	0,644
	Habitat				
	Gazon	NS	0,27	+	0,0015
	Prairie	NS	0,27	NS	0,068
	Friche	NS	0,27	NS	0,646
	Urbanisation	NS	0,25	-	0,029
	Densification	+	0,0036	+	0,0036
	X	-	0,0015	-	0,025
	Y	NS	0,22	-	0,027

La taille de l'inflorescence des poacées ne s'explique que par la densification, qui a un effet positif et la coordonnée X, qui a un effet négatif. Enfin, le diamètre des inflorescences d'astéracées s'explique par l'habitat, l'urbanisation, la densification et les coordonnées X et Y. A l'instar du diamètre des fleurs, une gestion forte semble être liée une augmentation du diamètre des inflorescences des astéracées. Il en va de même pour la densification qui a un effet positif sur cet attribut et l'urbanisation et les coordonnées X et Y qui ont un effet négatif. En d'autres termes, outre la surface, il semblerait que les variables explicatives aient le même effet pour le diamètre des fleurs et des inflorescences de poacées (Figure 14 et Figure 15).

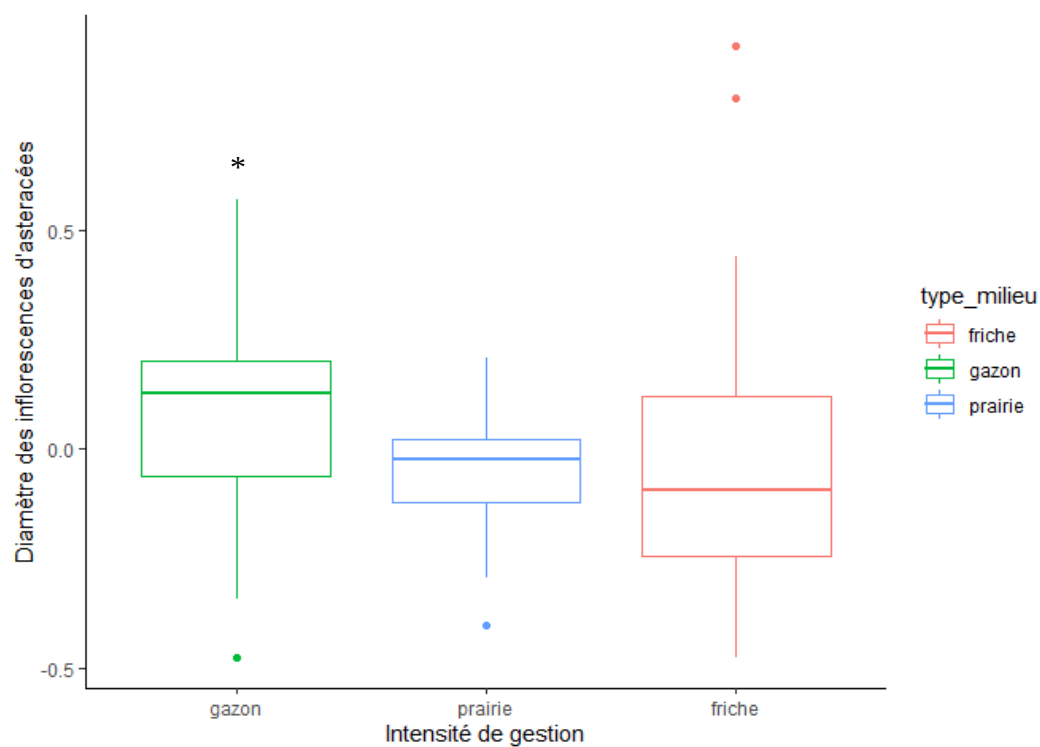


Figure 14 - Boxplot illustrant l'effet simple de l'habitat sur le diamètre des inflorescences des astéracées ($\alpha = 0.05$)

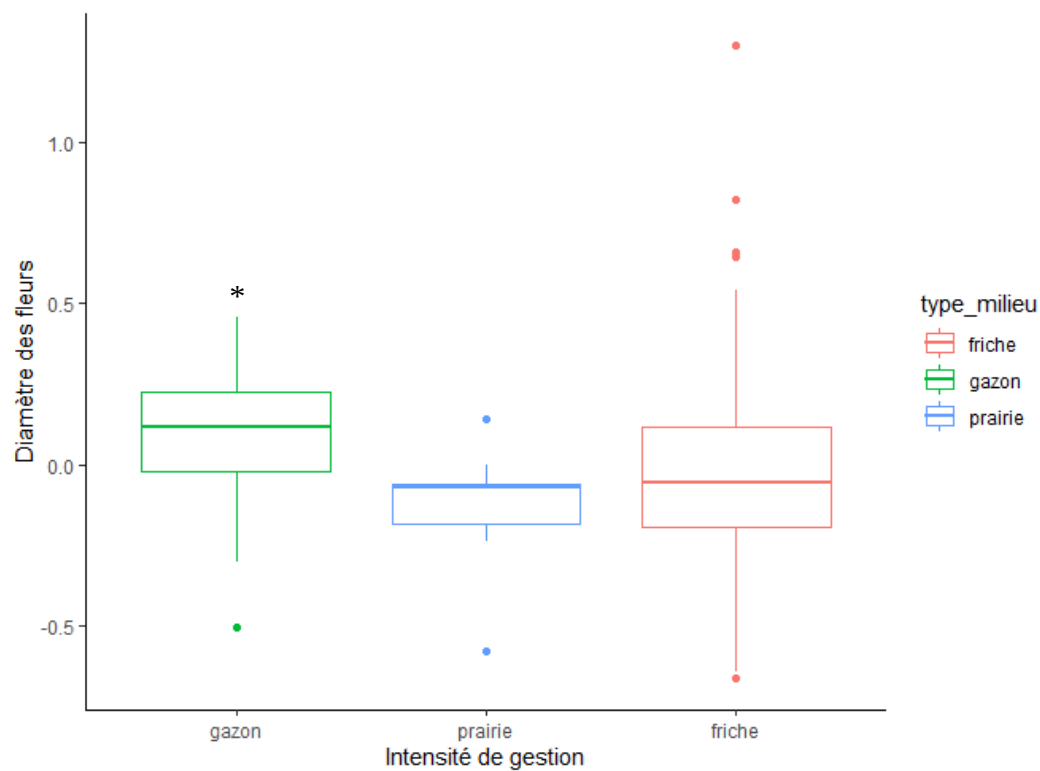


Figure 15 - Boxplot illustrant les résidus de l'effet simple de l'habitat sur le diamètre de fleurs ($\alpha = 0.05$)

4 DISCUSSION

4.1 RETOUR SUR LES RESULTATS

Richesse spécifique :

En analysant la diversité taxonomique, nous avons observé qu'une gestion moyenne ou faible avait un effet positif sur la richesse spécifique comparée à une gestion forte. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Marini *et al.* (2008). De plus, on observe que les effets locaux sont plus forts que les effets paysagers sur la richesse spécifique. La gestion a donc un rôle majeur dans la conservation de la biodiversité. Il est cependant important de noter que cette observation n'est pas valable pour l'indice d'équitabilité qui n'a pas réagi au modèle.

Surface foliaire spécifique :

À l'échelle communautaire, la SLA est affectée négativement par la densification. L'effet de la densification sur la SLA peut s'expliquer par un potentiel effet des îlots de chaleur urbains (Williams *et al.* 2015). Le gradient de densification que nous avons créé distingue des paysages urbains peu denses et périphériques des paysages urbains centraux.

Au niveau intraspécifique, nous retrouvons le même effet négatif de la densification sur la SLA. De plus, l'effet croisé avec l'habitat met en évidence que cet effet est surtout valable pour les gazons. En gardant l'hypothèse des effets d'îlots de chaleur, et en rappelant qu'une SLA intermédiaire est positive pour la croissance de la plante (Thompson et McCarthy 2007), il semblerait que les prairies et les friches supportent mieux l'effet de la densification (et donc des îlots de chaleur) que les gazons.

Néanmoins, à l'échelle spécifique, d'autres variables explicatives agissent sur la SLA. Nous avons observé un effet positif d'une gestion forte sur la SLA. Une SLA élevée est signe de perturbation des individus (Williams *et al.* 2015). Une gestion intense semble donc être une perturbation suffisamment forte pour affecter les fonctions de croissance des individus.

Nous observons également un léger effet positif du gradient d'urbanisation sur la SLA. Cet effet est moins fort que celui du gradient de gestion. Sachant que les gazons sont des habitats majoritairement urbains, il est possible qu'il existe un double effet sur les plantes de ces milieux (gestion plus urbanisation).

Enfin, nous avons observé un fort effet positif de la surface sur la SLA. Cet effet pourrait être dû à un effet de bordure plus important.

D'après nos résultats, pour limiter l'effet néfaste de l'urbanisation et de l'intensité de gestion sur les fonctions de croissance et d'acquisition des ressources (liées à la SLA) pouvant indirectement diminuer la valeur sélective des espèces, il semblerait que les prairies et friches soit à préconiser.

Enfin, nous avons observé plus de diversité d'effet des variables explicatives sur la SLA au niveau spécifique qu'au niveau communautaire. Cela peut s'expliquer par un changement de composition vers des espèces plus tolérantes à ces perturbations (Politi Bertoncini *et al.*, 2012).

Longueur étirée reproductrice :

Au niveau communautaire, nous avons observé un effet négatif d'une gestion forte sur la longueur étirée de reproduction. La hauteur de reproduction est un trait lié à la dispersion quel que soit le mode de dispersion (Weiher *et al.* 1999, Cornelissen 2003 ; Thomson *et al.* 2011). Ce résultat assez intuitif témoigne d'une diminution fonctionnelle de la dispersion au niveau communautaire. Au niveau spécifique, nous avons observé un effet positif d'une gestion faible ce qui est en cohérence avec le niveau communautaire. Néanmoins, lorsque cet effet est croisé avec les gradients paysagers, il devient significativement négatif pour une gestion moyenne (prairie). Ainsi, les friches urbaines sont donc d'autant plus importantes puisque les milieux fortement gérés sont majoritaires dans les paysages très urbains où la fragmentation est maximale. Néanmoins, la fonction affectée ici est la dispersion mais pas la fonction d'établissement. Nous avons vu, pendant la sélection des traits, qu'une stratégie favorisée par les villes est la non dispersion (Duncan *et al.* 2011 ; et Cheptou *et al.* 2008 ; Westoby *et al.* 2002). Ainsi, les milieux urbains favorisent pour les gazons et les prairies, les fonctions d'établissement et défavorisent les fonctions de dispersion alors que nous observons l'inverse pour les friches.

Au niveau spécifique, nous retrouvons également un effet négatif simple de la surface sur la LER. Nous supposons que ce résultat peut s'expliquer par la corrélation de la LER et de la LEV.

De plus, cet effet est absent au niveau communautaire. Il semblerait donc que le niveau communautaire cache certains effets des variables explicatives sur la LER ce qui suggère à nouveau un changement de composition d'espèces.

Traits floraux :

Au niveau spécifique, nous avons montré l'effet positif d'une gestion forte sur le diamètre des fleurs et des inflorescences des astéracées. Ces résultats soulèvent un biais dans notre méthode. Seul, le diamètre des fleurs ou des inflorescences est difficilement exploitables. Les astéracées mesurées sont majoritairement représentées par *Bellis perennis*, une espèce strictement de gazon et *Erigeron annuus*, une espèce de friche et de prairie. Les inflorescences d'*Erigeron annuus* sont plus petite que celles de *Bellis perennis* mais elles sont plus nombreuses. De plus, pour le diamètre des fleurs, nous avons trois espèces dont deux présentent des morphologies proches puisqu'il y a deux rampantes (*Convolvulus arvensis* et *Potentilla reptans*) Néanmoins, *Hypericum perforatum* présente plus de fleurs.

Ains, il faudrait ajouter une variable nombre de fleurs ou nombre d'inflorescences pour pondérer le diamètre des fleurs et le diamètre des inflorescences d'astéracées.

Nous pouvons néanmoins exploiter les données sur la taille des inflorescences de fabacées puisque cette mesure est pondérée par le nombre de fleurs par inflorescence. Ainsi, l'effet négatif de la surface sur la taille des inflorescences. L'étude des résidus du modèle sans la surface (annexe 4) nous montre que cet effet est tiré vers le bas par *Trifolium repens*.

Les données de longueur d'inflorescence des poacées et du plantain est également exploitable puisque cette mesure est dépendante du nombre de fleurs. Nous avons d'ailleurs observé un effet positif de la densification et en particulier sur *Dactylis glomerata* et *Plantago lanceolata*.

4.2 LIMITES ET PERSPECTIVES

Les mesures florales soulèvent des biais méthodologiques. Premièrement par la faible quantité de mesures qui s'explique par la création de 4 variables, divisant ainsi le nombre de mesures. Et deuxièmement par le fait que les variables ne sont pas toutes pondérées par le nombre de fleurs ou d'inflorescences. Cela complique l'analyse des résultats et ne reflète pas l'attractivité des fleurs pour les insectes.

De plus, nous avons vu qu'au niveau communautaire, les effets de l'environnement étaient bien moins visibles comparé au niveau spécifique. Nous avons expliqué cela par un changement de composition selon le gradient d'urbanisation et de gestion. Le gradient de gestion est lié à des physionomie différentes (gazon, prairie, friche) qui pourrait induire ce changement de

composition. Il serait donc intéressant d'affiner les connaissances sur la gestion en ajoutant notamment les méthodes de gestion et la fréquence des passages pour lisser le gradient.

Pour améliorer la robustesse des modèles, il faudrait réduire la liste d'espèce sur lesquelles les traits sont mesurés en supprimant celles qui n'ont été étudiées que sur quelques sites. C'est quelques occurrences peuvent venir parasiter le modèle en ayant une régression basée sur trop peu de points. De plus, il serait intéressant de se concentrer à la fois sur des espèces ubiquistes comme le plantain lancéolé (*Plantago lanceolata*), le trèfle des près (*Trifolium pratense*) et le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*) et des espèces très inféodée à un habitat comme le trèfle rampant (*Trifolium repens*) pour les gazons et le millepertuis (*Hypericum perforatum*) pour les friches. De cette façon, nous couvrirons mieux le gradient et nous pourrions étudier l'effet de nos variables sur une seule espèce.

Enfin, il semble clair que la longueur étirée végétative n'est pas exploitable dans cette étude. En plus d'être corrélée avec la longueur étirée reproductrice, elle présente une répartition de données très influencées par les espèces à rosette ayant une valeur nulle. Ainsi, nous n'arrivons pas à transformer cette variable. De plus, elle est parfois complexe à mesurer comme le soulignaient Garnier et Navas (2013).

Pour aller plus loin dans la compréhension des effets de gestion et d'urbanisation sur les traits fonctionnels, il serait intéressant d'ajouter d'autres traits notamment catégoriels (mode de dispersion et de pollinisation, type biologique, durée de vie, ...) qu'il serait possible d'étudier avec une analyse RLQ par exemple. Il serait également possible d'ajouter une deuxième campagne de mesure, plus tardive, centrée sur la récolte de graines pour étudier l'effet des variables explicatives sur la masse des graines. Comme nous l'avons vu, la masse des graines est un trait emblématique (Weiher *et al.* 1999) répondant bien à l'urbanisation (Duncan *et al.* 2011 ; Cheptou *et al.* 2008). De plus, la récolte de graines permettrait de faire pousser des individus de plusieurs populations en conditions contrôlées à l'instar de ce qui a été fait par Bakhtiari *et al.* (2019). Cette expérience nous permettrait de voir si les populations sont génétiquement différenciées ou si il s'agit de plasticité. Il s'agit d'une question centrale aujourd'hui dans la compréhension des effets des milieux urbains sur la flore.

CONCLUSION

Avec cette étude, nous avons pu mettre en évidence que les espaces herbacés urbains sont des milieux atypiques qui, de par leur hétérogénéité, présentant une grande biodiversité. Comprendre comment réagit cette diversité face aux différentes perturbations urbaines est un enjeu majeur. Nous avons suivi six traits fonctionnels (*i.e* la surface spécifique foliaire, la longueur étirée de reproduction et quatre traits floraux) le long de deux gradients paysagers et d'un gradient de gestion.

Nous avons observé plusieurs liens entre ces traits et les gradients. Premièrement, la surface spécifique foliaire est affectée à tous niveaux (communautaire et spécifique) pour les milieux fortement gérés (les gazons). Deuxièmement, la longueur étirée de reproduction est affectée négativement par nos gradients et en particulier dans les gazons et les prairies. Enfin, les traits floraux ont réagi de façon assez discutable ce qui nous a permis de soulever plusieurs biais dans ces variables.

En étudiant les liens entre les traits fonctionnels et les traits de performance des plantes, nous avons proposé des interprétations à partir de ces corrélations. Une intensité de gestion diminue la capacité des plantes à se disperser et à croître. En étudiant les effets croisés de nos gradients, nous avons soulevé des effets néfastes sur les fonctions de dispersion et de croissances accentués dans les milieux moyennement et très gérés.

Pour conclure, les espaces herbacés peu gérés (les friches) en milieux urbains peuvent atténuer les effets de ces derniers sur les valeurs sélectives des individus.

Pour augmenter la compréhension de mécanismes sous-jacents à ces effets, nous avons proposé des pistes d'amélioration de notre étude en ajoutant des nouveaux traits (masses des graines), en améliorant d'autres (traits floraux) et en proposant d'étudier les mécanismes génétiques conduisant aux variations des valeurs de traits observés pour à terme, renseigner les gestionnaires sur l'état fonctionnel des espaces herbacés urbains.

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP	Analyse en composantes principales
EMS	Eurométropole de Strasbourg
OCS	Occupation du Sol
LER	Longueur étirée reproductrice
LEV	Longueur étirée végétative
SLA	Specific Leaf Area
PAS	Port Autonome de Strasbourg
PLU	Plan Local d'Urbanisme
CWM	Community Weight Mean
Sertit	SERvice Régional de Traitement d'Image et de Télédétection

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Schéma inspiré de Garnier et Navas 2013 illustrant les différentes fonctions assurées par les plantes et les marqueurs fonctionnels associés	9
Figure 2 - Cadre théorique pour mesurer la différenciation écotypique et la plasticité phénotypique à l'aide d'expériences de transplantation. Les différents graphiques représentent tous les scénarios alternatifs. Les types de lignes représentent des écotypes	10
Figure 3 - Positionnement spatial des 41 sites d'étude dans leurs contexte paysager	15
Figure 4 - Résultat de l'analyse en composante principale sur les variables paysagères en haut et les corrélations associées.....	17
Figure 5 - Schéma de la disposition des quadrats pour l'inventaire.....	25
Figure 6 - Richesse spécifique en fonction du type de site	31
Figure 7 - Régression linéaire de la densification sur la SLA.....	32
Figure 8 - Régression linéaire de la densification sur la SLA.....	32
Figure 9 - Boxplot montrant l'influence de la gestion sur la LER.....	32
Figure 10 - Graphique illustrant les régressions linéaires de l'effet croisé entre l'habitat et l'urbanisation sur la LER ($\alpha = 0.05$)	34
Figure 11 - Graphique illustrant les régressions linéaires de l'effet croisé entre l'habitat et la densification sur la LER ($\alpha = 0.05$).....	34

Figure 12 - Graphique illustrant les régressions linéaires de l'effet croisé entre l'habitat et l'urbanisation sur la SLA ($\alpha = 0.05$)	36
Figure 13 - Graphique illustrant les régressions linéaires de l'effet croisé entre l'habitat et la densification sur la SLA ($\alpha = 0.05$)	36
Figure 14 - Boxplot illustrant l'effet simple de l'habitat sur le diamètre des inflorescences des astéracées ($\alpha = 0.05$)	38
Figure 15 - Boxplot illustrant les résidus de l'effet simple de l'habitat sur le diamètre de fleurs ($\alpha = 0.05$)	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Présentation des classes d'occupation du sol du plan local d'urbanisme de l'EMS	14
Tableau 2 - Nouvelles variables paysagères créées à partir du PLU et du SERTIT	14
Tableau 3 - Résumé de la connaissance sur les effets de l'urbanisation sur les traits fonctionnels associés à la croissance	20
Tableau 4 - Résumé de la connaissance sur les effets de l'urbanisation sur les traits fonctionnels associés à la reproduction	21
Tableau 5 - Résumé de la connaissance sur les effets de l'urbanisation sur les traits fonctionnels associés à la survie	22
Tableau 6 - Listes des espèces sur lesquelles sont mesurés les traits	24
Tableau 7 - Résumé des mesures florales selon les espèces	27
Tableau 8 - Résumé des mesures florales selon les espèces	30
Tableau 9 - Résultats du modèle linéaire sur la LER ($\alpha = 0.05$)	33
Tableau 10 - Résultats du modèle linéaire sur la SLA ($\alpha = 0.05$)	35
Tableau 11 - Résultats des modèles linéaires sur les attributs floraux ($\alpha = 0.05$)	37

Articles

- Agrawal, A. A. (2001). Phenotypic plasticity in the interactions and evolution of species. *Science*, 294(5541), 321-326.
- Bakhtiari, M., Formenti, L., Caggia, V., Glauser, G., & Rasman, S. (2019). Variable effects on growth and defense traits for plant ecotypic differentiation and phenotypic plasticity along elevation gradients. *Ecology and evolution*, 9(7), 3740-3755.
- Bouchet, S., Bertin, P., Presterl, T., Jamin, P., Coubriche, D., Gouesnard, B., ... & Charcosset, A. (2017). Association mapping for phenology and plant architecture in maize shows higher power for developmental traits compared with growth influenced traits. *Heredity*, 118(3), 249-259.
- Chapin, F. S., & Chapin, M. C. (1981). Ecotypic differentiation of growth processes in *Carex aquatilis* along latitudinal and local gradients. *Ecology*, 62, 1000–1009.
- Cheptou, P. O., Carrue, O., Rouifed, S., & Cantarel, A. (2008). Rapid evolution of seed dispersal in an urban environment in the weed *Crepis sancta*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(10), 3796-3799.
- Cochard, A., Pithon, J., Braud, F., Beaujouan, V., Bulot, A., & Daniel, H. (2019). Intraspecific trait variation in grassland plant communities along urban-rural gradients. *Urban Ecosystems*, 22(3), 583-591.
- Collins, J.P., Kinzig, A., Grimm, N.B., Fagan, W.F., Hope, D., Wu, J. & Borer, E.T. (2000) A New Urban Ecology Modeling human communities as integral parts of ecosystems poses special problems for the development and testing of ecological theory. *American scientist*, 88, 416–425.
- Cornelissen, J.H.C., Lavorel, S., Garnier, E., Díaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D.E., Reich, P.B., Steege, H. ter, Morgan, H.D., Heijden, M.G.A. van der, Pausas, J.G. & Poorter, H. (2003) A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51, 335.
- Denny, E. G. *et al.* Standardized phenology monitoring methods to track plant and animal activity for science and resource management applications. *Int J Biometeorol* 58, 591–601 (2014).
- Dolan, W. L., & Chapple, C. (2017). Conservation and divergence of mediator structure and function: insights from plants. *Plant and cell physiology*, 58(1), 04-21.

- Duncan, R.P., Clemants, S.E., Corlett, R.T., Hahs, A.K., McCarthy, M.A., McDonnell, M.J., Schwartz, M.W., Thompson, K., Vesk, P.A., Williams, N.S.G., 2011. Plant traits and extinction in urban areas: a meta-analysis of 11 cities. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 20,509–519.
- Godefroid, S., & Koedam, N. (2007). Urban plant species patterns are highly driven by density and function of built-up areas. *Landscape Ecology*, 22(8), 1227-1239.
- Grime, J. P. (1974). Vegetation classification by reference to strategies. *Nature*, 250(5461), 26-31.
- Grime, J. P. (1997). Biodiversity and ecosystem function: the debate deepens. *Science*, 277(5330), 1260-1261.
- Hahs, A.K., McDonnell, M.J., McCarthy, M.A., Vesk, 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.
- Hammond, D. S., & Brown, V. K. (1995). Seed size of woody plants in relation to disturbance, dispersal, soil type in wet neotropical forests. *Ecology*, 76(8), 2544-2561.
- Harmens, H. Is Partitioning of Dry Weight and Leaf Area Within *Dactylis glomerata* Affected by N and CO₂ Enrichment? *Annals of Botany* 86, 833–839 (2000).
- Hill, M. O. (1973). Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54(2), 427-432.
- Hill, M.O., Roy, D.B., Thompson, K., 2002. Hemeroby, urbanity and ruderality: bioindicators of disturbance and human impact. *J. Appl. Ecol.* 39, 708–720.
- Knapp, S., Kühn, I., Wittig, R., Ozinga, W.A., Poschlod, P., Klotz, S., 2008. Urbanization causes shifts in species' trait state frequencies. *Preslia* 80, 375–388.
- Knapp, S., Kühn, I., Bakker, J.P., Kleyer, M., Klotz, S., Ozinga, W.A., Poschlod, P., Thompson, K., Thuiller, W., Römermann, C., 2009. How species traits and affinity to urban land use control large-scale species frequency. *Divers. Distrib.* 15,533–546.
- Knapp, S., Kühn, I., Stolle, J., Klotz, S., 2010. Changes in the functional composition of a Central European urban flora over three centuries. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* 12, 235–244.
- Kleyer, M., Bekker, R. M., Knevel, I. C., Bakker, J. P., Thompson, K., Sonnenschein, M., ... & Klotz, S. R. G. M. (2008). The LEDA Traitbase: a database of life-history traits of the Northwest European flora. *Journal of ecology*, 96(6), 1266-1274.

- Konieczny, A., & Ausubel, F. M. (1993). A procedure for mapping *Arabidopsis* mutations using co-dominant ecotype-specific PCR-based markers. *The plant journal*, 4(2), 403-410.
- Lehane, F., & Muratet, A. (2014). Groupe de travail sur les prairies urbaines et naissance du programme « Florilèges - prairies urbaines ». *Biodiversitaire*, 102–106.
- Lepš, J., Brown, V. K., Diaz Len, T. A., Gormsen, D., Hedlund, K., Kailová, J., ... & Santa Regina, I. (2001). Separating the chance effect from other diversity effects in the functioning of plant communities. *Oikos*, 92(1), 123-134.
- Marini, L., Fontana, P., Scotton, M., & Klimek, S. (2008). Vascular plant and Orthoptera diversity in relation to grassland management and landscape composition in the European Alps. *Journal of Applied Ecology*, 45(1), 361-370.
- McDonnell, M.J. & Hahs, A.K. (2008) The use of gradient analysis studies in advancing our understanding of the ecology of urbanizing landscapes: current status and future directions. *Landscape Ecology*, 23, 1143–1155.
- McGill, B.J., Enquist, B.J., Weiher, E. & Westoby, M. (2006) Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology & Evolution*, 21, 178–185.
- Montague, J. L., Barrett, S. C. H., & Eckert, C. G. (2008). Re-establishment of clinal variation in flowering time among introduced populations of purple loosestrife (*Lythrum salicaria*, Lythraceae). *Journal of evolutionary biology*, 21(1), 234-245.
- Moles, A. T., Ackerly, D. D., Tweddle, J. C., Dickie, J. B., Smith, R., Leishman, M. R. & Westoby, M. (2007). Global patterns in seed size. *Global ecology and biogeography*, 16(1), 109-116.
- Niemelä, J. (1999) Ecology and urban planning. *Biodiversity & Conservation*, 8, 119–131.
- Pilon, J., Santamaría, L., Hootsmans, M., & van Vierssen, W. (2003). Latitudinal variation in life-cycle characteristics of *Potamogeton pectinatus* L.: vegetative growth and asexual reproduction. *Plant Ecology*, 165(2), 247-262.
- Politi Bertoncini, A., Machon, N., Pavoine, S., & Muratet, A. (2012). Local gardening practices shape urban lawn floristic communities. *Landscape and Urban Planning*, 105(1–2), 53–61.
- Preston, C.D., 2000. Engulfed by suburbia or destroyed by the plough: The ecology of extinction in Middlesex and Cambridgeshire. *Watsonia* 23, 59–81.
- Raunkiaer, C. (1934). *The life forms of plants and statistical plant geography; being the collected papers of C. Raunkiaer*

- Roche, H. (2016). Utilisation des traits écologiques pour analyser la réponse des communautés végétales et de leurs pollinisateurs à la gestion des espaces verts en milieu urbain. 65.
- Rupprecht C.D.D, Byrne J.A. (2014). Informal urban greenspace : comparison of quantity and characteristics in Brisbane, Australia and Sapporo, Japan. PLoS One 9 : e99784.
- Rupprecht, C.D.D., Byrne, J.A., Garden, J.G. & Hero, J.-M. (2015). Informal urban green space : A trilingual systematic review of its role for biodiversity and trends in the literature. Urban Forestry & Urban Greening, 14, 883–908.
- Schindler, S., K. Poirazidis and T. Wrbka (2008). "Towards a core set of landscape metrics for biodiversity assessments : A case study from Dadia National Park, Greece." Ecological Indicators 8(5) : 502-514.
- Sukopp, H. (1998) Urban Ecology — Scientific and Practical Aspects. Urban Ecology, pp. 3–16. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sukopp, H. (2008) On the Early History of Urban Ecology in Europe. Urban Ecology, pp. 79–97. Springer, Boston, MA.
- Thomas, H. (2013). Senescence, ageing and death of the whole plant. New Phytologist, 197(3), 696-711.
- Thompson, K., McCarthy, M.A., 2008. Traits of British alien and native urban plants. J. Ecol. 96, 853–859.
- 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. Journal of Ecology, 99(6), 1299-1307.
- Tilman, D., Knops, J., Wedin, D., Reich, P., Ritchie, M., & Siemann, E. (1997). The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. Science, 277(5330), 1300-1302.
- Vile, D., Garnier, E., Shipley, B., Laurent, G., Navas, M. L., Roumet, C., ... & Midgley, G. F. (2005). Specific leaf area and dry matter content estimate thickness in laminar leaves. Annals of botany, 96(6), 1129-1136.
- 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.
- Warwick, R. M., & Clarke, K. R. (1995). New biodiversity measures reveal a decrease in taxonomic distinctness with increasing stress. Marine ecology progress series, 129, 301-305.

- Weiher, E., Van Der Werf, A., Thompson, K., Roderick, M., Garnier, E., & Eriksson, O. (1999). Challenging Theophrastus: a common core list of plant traits for functional ecology. *Journal of vegetation science*, 10(5), 609-620.
- Westoby, M., Falster, D.S., Moles, A.T., Vesk, P.A., Wright, I.J., 2002. Plant ecological strategies : some leading dimensions of variation between species. *Annu. Rev.Ecol. Syst.* 33, 125–159.
- Whitlow, L. W., Riordan, E. M., Dasu, S., Rock, S., & Bodek, A. (1992). Precise measurements of the proton and deuteron structure functions from a global analysis of the SLAC deep inelastic electron scattering cross sections. *Physics Letters B*, 282(3-4), 475-482.
- Willdenow, K.L. (1787) *Florae Berolinensis Prodomus Secundum Systema Linneanum* Ab CP
- 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. *J. Ecol.* 93, 1203–1213.
- Williams, N.S.G., Hahs, A.K. & Vesk, P.A. (2015) Urbanisation, plant traits and the composition of urban floras. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 17, 78–86.
- Wu, J. (2014) Urban ecology and sustainability : The state-of-the-science and future directions. *Landscape and Urban Planning*, 125, 209–221.
- Yakub, M., & Tiffin, P. (2017). Living in the city : urban environments shape the evolution of a native annual plant. *Global change biology*, 23(5), 2082-2089.

Ouvrages

- AMIGUES S., 2010. « S Théophraste. Recherches sur les plantes. À l'origine de la botanique », Belin, Paris : 900 pages.
- ARNOULD P. et SIMON L., 2007. « Géographie de l'environnement : cours, documents, entraînement », Belin atouts. Géographie, Paris : 303 pages.
- BENZCRI J-P., 1973. ; « Analyse des données », Dunod décision, Paris.
- BRAUN-BLANQUET J., 1928. « Pflanzensoziologie. Grundzüge der vegetationskunde », Biologische Studienbücher, Berlin : 330 pages.
- Burel, F., Baudry, J., 1999. « Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications », TEC & DOC, Paris : 359.
- DARWIN C., 1859. ; « The Origin of species », John Murray, London : 416 pages.

- FENNER M., THOMPSON K., 2005. « The ecology of seeds », Cambridge University Press, Cambridge : 264 pages.
- GARNIER E. et NAVAS M-L., 2013. « Diversité fonctionnelle des plantes », de Boeck supérieur, Bruxelles : 353 pages.
- TERASSON F., 1988. « La peur de la Nature », Sang de la Terre, Paris : 270 pages.
- LIZET B., WOLF A.-É. et CELECIA J., 1999. « Sauvages dans la Ville. De l'inventaire naturaliste à l'écologie urbaine », Publications Scientifiques du Muséum, Paris : 607 pages.

R studio et packages

- R Core Team (2020). R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Bivand, R., Keitt, T., Rowlingson, B., Pebesma, E., Sumner, M., Hijmans, R., ... & Bivand, M. R. (2015). Package 'rgdal'. Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library. Available online : <https://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/index.html> (accessed on 15 October 2017).
- Fox, J., Friendly, G. G., Graves, S., Heiberger, R., Monette, G., Nilsson, H., ... & Suggests, M. A. S. S. (2007). The car packages. R Foundation for Statistical Computing.
- Husson, F., Josse, J., Le, S., Mazet, J., & Husson, M. F. (2016). Package 'FactoMineR'. An R package, 96, 698.
- Oksanen, J., Kindt, R., Legendre, P., O'Hara, B., Stevens, M. H. H., Oksanen, M. J., & Suggests, M. A. S. S. (2007). The vegan package. Community ecology package, 10(631-637), 719.
- Wei, T., Simko, V., Levy, M., Xie, Y., Jin, Y., & Zemla, J. (2017). Package 'corrplot'. *Statistician*, 56(316), e24.

ANNEXES

Annexe 1 : Utilisation du terme trait selon le niveau d'organisation étudié (d'après Violle *et al.* 2007).

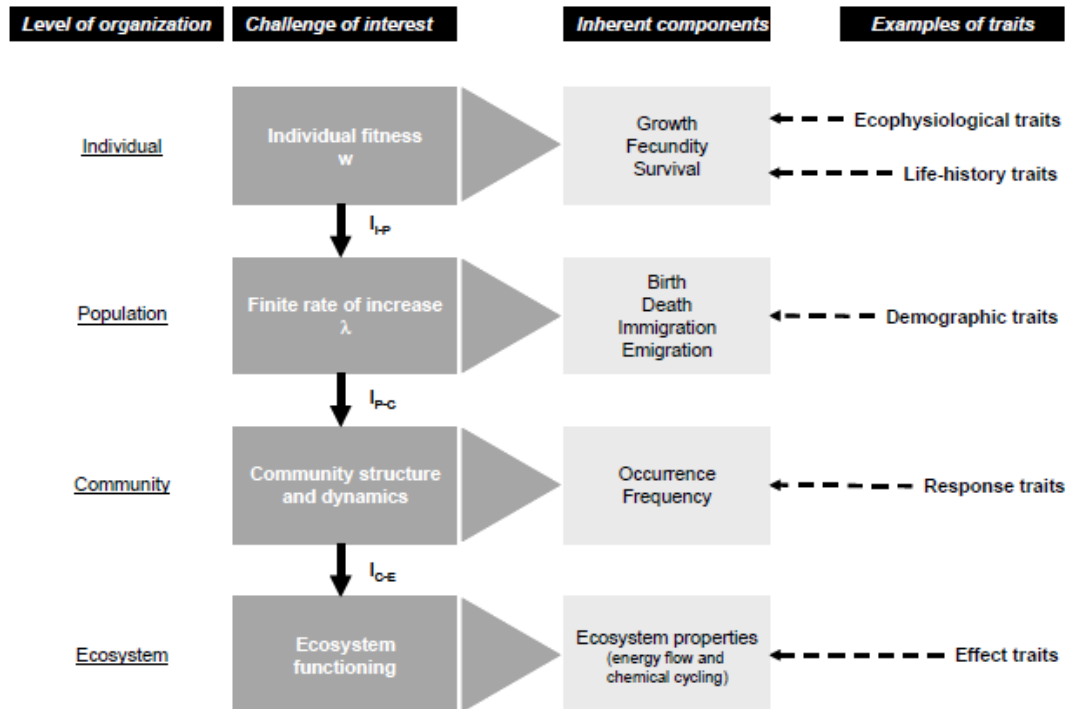
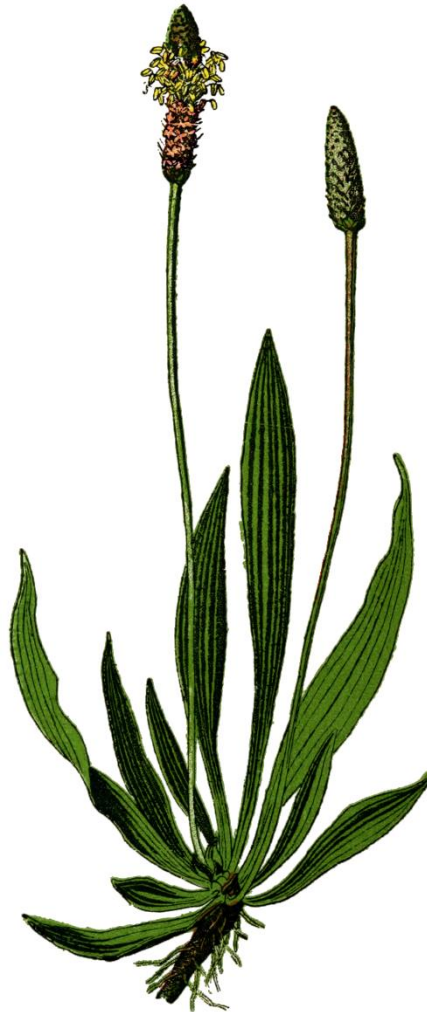


Fig. 1. Pathways linking the challenge of interest of different organizational levels, through their related inherent components, to some examples of traits found in the literature. Without trait-based information, scaling-up to higher organizational levels needs complex integration information (I). Thus fitness components of an individual determine the components of the finite rate of increase (λ) of the population (I_{I-P}). Occurrence and frequency of species at the community level encompass components of λ through complex integration (e.g. biotic interactions) (I_{P-C}). Finally, scaling-up to ecosystem properties can be done by combining functional property of each species of the community (I_{C-E}). Using traits as proxies of a process at a particular organizational level can sometimes be done without such integration function. For example, at the ecosystem level, ecosystem productivity (one component of ecosystem functioning) shows a strong positive relationship with plant height (an effect trait) (Saugier *et al.* 2001).

Annexe 2 : Fiche de terrain utilisé pour l'inventaire floristique

Mesure de traits des plantes de communautés herbacées le long d'un gradient d'artificialisation du paysage



Plantago lanceolata - Wayside and woodland blossoms; a pocket guide to British wild flowers for the country Rambler

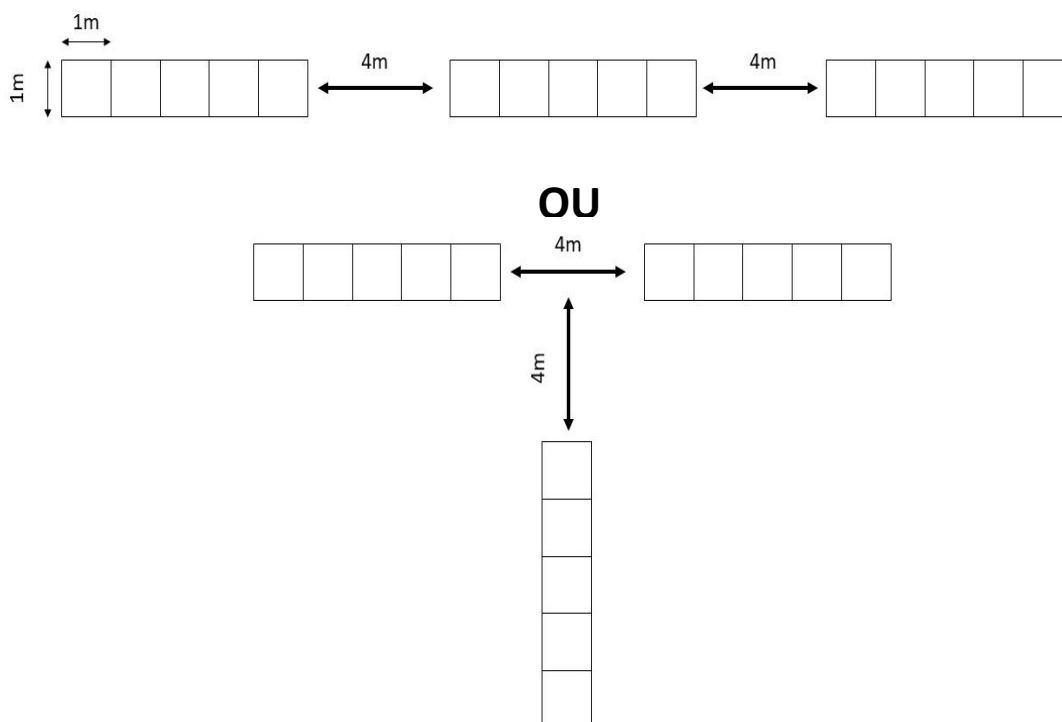
Guide conçu par Clément GROS, Audrey MURATET et Laurent HARDION du Laboratoire Image ville
environnement, Université de Strasbourg

Ce guide de terrain trouve ses bases dans les protocoles standardisés de mesures des traits fonctionnels des plantes (Cornelissen *et al.* 2003, Pérez-Harguindeguy *et al.* 2013) et ont été détaillés et adaptés pour les espaces et espèces étudiés.

SUR LE TERRAIN

Relevés floristiques avec indication de fréquences et de phénologie

- 1) Placer 15 quadrats de 1m² par espace herbacé regroupés en 3 lignes de 5x1m² distantes de 4 mètres entre elles et situées environ au centre du site (ou pour les grands sites, à au moins 20 mètres de la bordure). En fonction de la forme du site, il est possible soit de les placer en lignes, soit de les disposer en croix. 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. Chaque site est noté par un code chiffré à reporter sur les fiches terrains et les prélèvements avec la date de relevé et le nom d'observateur.



- 2) Au sein de chaque quadrat, relever toutes les espèces présentes (fiche terrain en Annexe A).

Associer pour chaque espèce et pour chaque quadrat **la phénophase de l'individu le plus avancé sauf pour l'état sec qui ne sera considéré que si aucun individu frais n'est présent dans le quadrat.**

- 3) Si dans le quadrat, 1 seul individu de l'espèce est en fleur et les autres à l'état végétatif, on considérera que l'espèce est à l'état de fleur. Nous distinguons ainsi 4 Catégories phénologiques : **Végétatif, Fleur, Fruit et Sec** d'après Denny *et al.* (2014). Qui sont notées dans les relevés dans ce même ordre A, B, C D.
 - A : phénophase végétative dès la croissance initiale jusqu'à la phénophase fleur.
 - B : phénophase fleur dès qu'un bourgeon floral est visible jusqu'à la phénophase fruit.
 - C : phénophase fruit dès qu'au moins un fruit est visible jusqu'à ce que la plante soit sèche.
 - D : phénophase sèche dès qu'elle est sèche (et s'il n'y a pas d'autres phases visibles dans le quadrat, sinon indiquer uniquement la phénophase « fraîche »).

Si la plante est présente à la fois en fleur et en fruit, noter la double phase (BC

Mesures des traits morphologiques

Le tableau en annexe C liste les espèces pour lesquelles des traits seront mesurés. Pour chaque site, choisir **5 espèces** du tableau. Les espèces choisies doivent être largement présentes sur le site. Tacher, selon les espèces présentes sur le site, de sélectionner à la fois des espèces ubiquistes et des espèces plus exigeantes. Si deux espèces pour lesquelles il est précisé « au choix » sur le tableau sont présentes sur le même site, choisir l'espèce la plus présente.

Pour chaque espèce choisie, prélever **10 individus**. Les individus doivent être en fleurs - environ de la taille maximale de ce qui est observable dans la prairie - en bonne santé - pas de signe d'herbivorie, de cassure ou de maladie - et être le plus exposé possible à la lumière.

Pour chacun des 10 individus, noter sur la fiche et les prélèvement le code formé du code de la prairie, la date, les initiales de l'espèce et le numéro d'individu (par exemple 57-280520-PL-1 : prairie 57, le 28 mai 2020, *Plantago lanceolata*, individu 1) :

Plante entière - Mesurer (au cm près) et la **longueur étirée de reproduction** (LER) et compléter la grille de terrain (Annexe C).

- LER : Elle est définie comme la longueur maximale d'un individu étiré (sans tenir compte de la position dans l'espace de l'individu) entre son point d'attache principal et ses derniers tissus reproducteur (fleurs).

Feuille - Prélever une partie de l'individu à mi-hauteur contenant **2 feuilles matures**, bien exposées et en bonne santé. Les feuilles se conserveront mieux en étant encore attaché à une tige si possible. Conserver les feuilles ou les rameaux dans un essuie tout humide et stocké dans un sachet plastique étanche à ZIP

Semences - Prélever au moins **10 semences** avec leurs appendices s'il y en a. Conserver les semences dans des sachets papier codés.

Fleurs - Nous considérons quatre mesures de traits floraux différents selon la famille. Calculer le diamètre des inflorescences pour les astéracées, et pour les plantes à fleurs simples. Calculer la taille de l'inflorescence pour les fabacées en multipliant le nombre de fleurs par inflorescence par la longueur d'une fleur de cette même inflorescence. Calculer la longueur de l'inflorescence pour les poacées et le plantain.

Les mesures sont résumées dans le tableau suivant :

Espèces	Famille	Traits floral mesuré
<i>Bellis perennis</i>	Asteraceae	Diamètre de l'inflorescence
<i>Erigeron annuus</i>	Asteraceae	Diamètre de l'inflorescence
<i>Hypochaeris radicata</i>	Asteraceae	Diamètre de l'inflorescence
<i>Convolvulus arvensis</i>	Convolvulaceae	Diamètre d'une fleur
<i>Lotus corniculatus</i>	Fabaceae	Taille de l'inflorescence
<i>Medicago lupulina</i>	Fabaceae	Taille de l'inflorescence
<i>Trifolium pratense</i>	Fabaceae	Taille de l'inflorescence
<i>Trifolium repens</i>	Fabaceae	Taille de l'inflorescence
<i>Hypericum perforatum</i>	Hypericaceae	Diamètre d'une fleur
<i>Plantago lanceolata</i>	Plantaginaceae	Longueur de l'inflorescence
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Poaceae	Longueur de l'inflorescence
<i>Dactylis glomerata</i>	Poaceae	Longueur de l'inflorescence
<i>Potentilla reptans</i>	Rosaceae	Diamètre d'une fleur

EN LABORATOIRE

Surface spécifique foliaire

Il s'agit de la surface de la feuille fraîche divisé par son poids sec.

Prise de vue. La mesure de surface doit se faire dans les 24h après le prélèvement. Étaler et aplatir la feuille sur une feuille de papier blanche, elle-même placée sur un support parfaitement horizontal (utiliser un niveau à bulle). Placer une échelle de 10 cm à côté de la feuille. L'appareil photo doit être placé au-dessus de la feuille, lui aussi parfaitement horizontal. Prendre une photo dans le noir avec le flash pour limiter au maximum les ombres. Tant que les feuilles ne sont pas trop proches les unes des autres, il est possible de prendre plusieurs feuilles sur une même photographie si celles-ci sont bien identifiées.

Traitement imageJ. Sur un ordinateur, ouvrir la photo dans imageJ. Calibrer l'échelle en tirant un trait de 10cm avec  sur votre échelle. Définir la longueur du trait (Analyze → Set Scale) (annexe D.1). Passer l'image en noir et blanc (Image → Colours → Split Channels). Trois images sont proposées, continuer les traitements avec l'image « Blue 33.3% ». Contraster au maximum l'image (Image → Adjust → Threshold) en déplaçant les deux curseurs pour réduire la gamme de couleur (annexe D.2). Depuis l'onglet Analyze (→ Tools → ROI Manager) et l'outil  entrer les surfaces de chaque feuille avec l'option add it et en identifiant la feuille selon le code déjà fourni précédemment et terminé par F1 ou F2 (feuille 1 et feuille 2). En cliquant sur l'onglet mesure, vous obtiendrez un tableau avec toutes les surfaces.

Séchage. Placer séparément les feuilles de chaque individu dans du papier filtre qui reprendra le code du relevé auquel il sera ajouté 1 ou 2. (par exemple 57-280520-VP-1-1 : prairie 57, le 28 mai 2020, Veronica persica, individu 1, feuille 1). Mettre les enveloppes en étuve à 80°C pendant 48h.

Pesée. Peser les feuilles sèches sur une balance avec une précision à 0.0001g. Le calcul de la surface spécifique foliaire correspond à la surface fraîche obtenue avec imageJ divisé par le poids sec.

Masse des semences

Les mesures de masse se font sur les graines sèches. Prélever une cinquantaine de semences sur tout le site pour *Plantago lanceolata*, *Erigeron annuus*, *Hypochaeris radicata*, *Medicago lupulina* et *Lotus corniculatus*. Pour les autres espèces, cette mesure n'est pas possible car les semences sont trop petites pour être détecter (avec un nombre raisonnable) par une balance avec une précision de 0.0001g.

Stockage. Les semences sont stockées dans un sachet en papier numéro

Séchage. Placer graines dans du papier filtre identifiées. Mettre les filtres en étuve à 80°C pendant 48h sans flux d'air ou à 50°C avec flux d'air.

Pesée. Une fois les semences séchées, retirer tous les éléments accessoires pour ne garder que les graines. Peser 10 graines en même temps

PROTOCOLE SPECIFIQUE - ADAPTATION DES PROTOCOLES POUR CHAQUE ESPECE

La diversité de morphologie des espèces nous a conduit à la production d'un protocole spécifique. Si rien n'est précisé, appliquer le protocole général.

Asteraceae* – *Bellis perennis*, *Erigeron annuus*, *Hypochaeris radicata

Mesures florales

Pour *Bellis perennis* et *Erigeron annuus*, deux mesures florales sont effectuées sur les fleurs les plus ouvertes. La longueur des pétales soudés d'une fleur ligulée et le diamètre du cercle formé par les fleurs tubulées. *Hypochaeris radicata* ne présente pas de fleurs tubulées. Ne mesurer que la longueur d'une fleur ligulée.

Mesures SLA

Les deux plus grandes feuilles en bon état de chaque individu seront utilisées pour les mesures de SLA. Cela se traduit chez *Erigeron annuus* par le prélèvement des feuilles les plus basales en bon état. Chez les deux astéracées à rosette, effectuer la coupe le plus au centre possible.

Convolvulaceae* – *Convolvulus arvensis

Mesures de la longueur étirée reproductrice :

Convolvulus arvensis est une espèce rampante. La mesure de la longueur étirée reproductrice se fait à partir du point d'ancrage (où la tige est souvent coudée) jusqu'à la fleur la plus éloignée.

Mesures florales :

La corolle est soudée et son degré d'ouverture fluctue au cours de la journée. Pour pallier à cette fluctuation, nous calculons le diamètre maximal de la corolle en multipliant par deux la longueur maximale d'un pétale.

Fabaceae* – *Lotus corniculatus*, *Medicago lupulina*, *Trifolium pratense*, *Trifolium repens

Mesures de la longueur étirée reproductrice :

Trifolium repens est une espèce rampante. La mesure de la longueur étirée reproductrice se fait à partir du point d'ancrage (où la tige est souvent coudée) jusqu'à la fleur la plus éloignée.

Mesures de SLA :

Sélectionner les deux feuilles les plus basales en bon état (bractées exclues) de l'axe principal en bon état. Joggy *et al.* 1983 et Dean et Long 1986 ne prenaient pas en compte les stipules chez *Trifolium pratense* dans les mesures foliaires. Pour l'ensemble des fabacées, les stipules ne seront pas comptées pour les mesures de SLA. Pour faciliter la mise à plat des feuilles, il est possible de séparer pétiole et folioles.



Hypericaceae – Hypericum perforatum

Mesure SLA:

Utiliser uniquement les feuilles de l'axe principal. Prélever les premières feuilles basales en bon état en évitant de prendre les deux feuilles sur le même nœud.

Poaceae – Arrhenatherum elatius, Dactylis glomerata, Holcus lanatus, Poa pratensis, Poa trivialis

Mesures florales :

Pour toutes les poacées, deux mesures de traits floraux seront prises en compte. Mesurer la longueur de l'inflorescence entre l'insertion du premier pédicelle et la dernière fleur.

Mesure de SLA :

Les poacées présentent peu de feuilles. Afin d'éviter un sous échantillonnage en ne sélectionnant que les quelques individus qui présentent deux feuilles intactes, la mesure de la SLA se fait sur une seule feuille. La dernière feuille étant souvent plus petite que les autres et les feuilles basales souvent abimées, nous travaillerons sur l'avant dernière feuille.



La feuille des poacées est engainante. D'un point de vue anatomique, elle s'étend du nœud à l'extrémité du limbe. Pour les mesures de surface, nous ne considérerons que le limbe en excluant la gaine foliaire (Harmens *et al.* 2000). La coupe se fait entre la ligule et le limbe.

Bibliographie :

Cochard, A. *et al.* Intraspecific trait variation in grassland plant communities along urban-rural gradients. *Urban Ecosyst* **22**, 583–591 (2019).

Cornelissen, J. H. C. *et al.* A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Aust. J. Bot.* **51**, 335 (2003).

Denny, E. G. *et al.* Standardized phenology monitoring methods to track plant and animal activity for science and resource management applications. *Int J Biometeorol* **58**, 591–601 (2014).

Harmens, H. Is Partitioning of Dry Weight and Leaf Area Within *Dactylis glomerata* Affected by N and CO₂ Enrichment? *Annals of Botany* **86**, 833–839 (2000).

Pérez-Harguindeguy, N. *et al.* New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Aust. J. Bot.* **61**, 167 (2013).

Matériel :

Pour le terrain :

- Mètre ruban
- Petites pochettes à ZIP (4x6cm environ) pour les graines
- Grandes pochettes ZIP (15x20 environ) pour les feuilles
- Grille de relevés de traits
- Grille d'inventaire d'espèces
- Ciseau fin
- Pince
- Sopalin
- Eau
- Loupe de terrain
- Marqueur indélébile

En laboratoire :

- Ordinateur avec le logiciel ImageJ
- Balance de précision (0.0001g)
- Etuve
- Appareil photo ou smartphone
- Un niveau à bulle pour mettre l'appareil photo et les feuilles parfaitement à l'horizontal.
- Enveloppe craft

ANNEXE A - FICHE RELEVES FLORE ET PHENOLOGIE

Fiche de terrain - Inventaire espèce et phénologie

Plan :

Position GPS :

Photo :

A végétatif, B fleur, C fruit, D sec

[illegible]

ANNEXE B – LISTE D'ESPECES

Espèces	Famille	Stratégie de Pollinisation	Stratégie deDispersion
<i>Bellis perennis</i>	Asteraceae	Entomogame	Anémochore
<i>Erigeron annuus</i>	Asteraceae	Entomogame	Anémochore
<i>Hypochaeris radicata</i>	Asteraceae	Entomogame	Anémochore
<i>Convolvulus arvensis</i>	Convolvulaceae	Entomogame	Barochore
<i>Lotus corniculatus</i>	Fabaceae	Entomogame	Barochore
<i>Medicago lupulina</i>	Fabaceae	Entomogame	Barochore
<i>Trifolium pratense</i>	Fabaceae	Entomogame	Epizoochore
<i>Trifolium repens</i>	Fabaceae	Entomogame	Epizoochore
<i>Hypericum perforatum</i>	Hypericaceae	Entomogame	Anémochore
<i>Plantago lanceolata</i>	Plantaginaceae	Entomogame	Barochore
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Poaceae	Anémogame	Epizoochore
<i>Dactylis glomerata</i>	Poaceae	Anémogame	Epizoochore
<i>Potentilla reptans</i>	Rosaceae	Entomogame	Barochore

Annexe C – Fiche relevé de taille

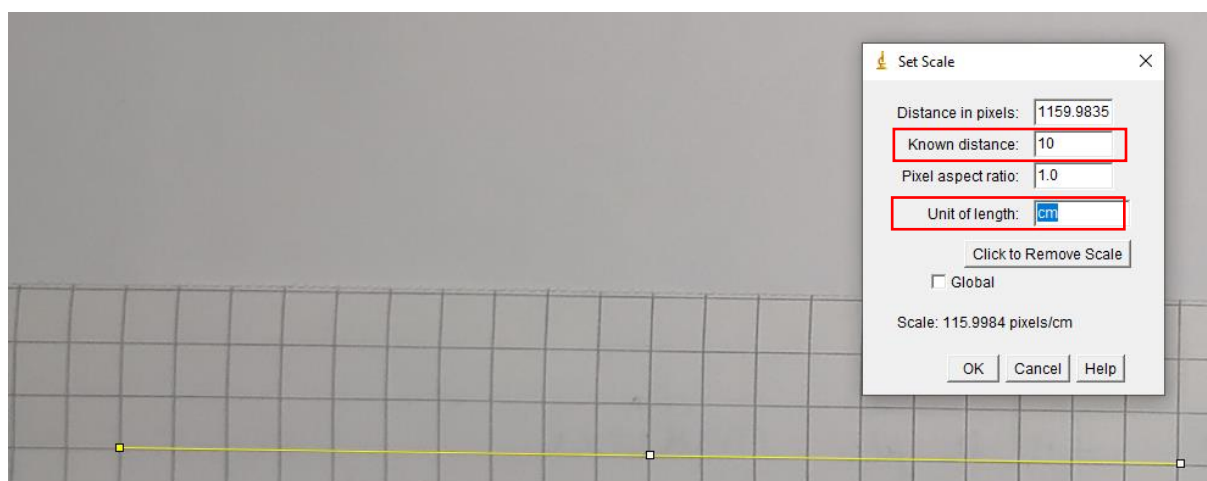
Site : Date :

Espèce :

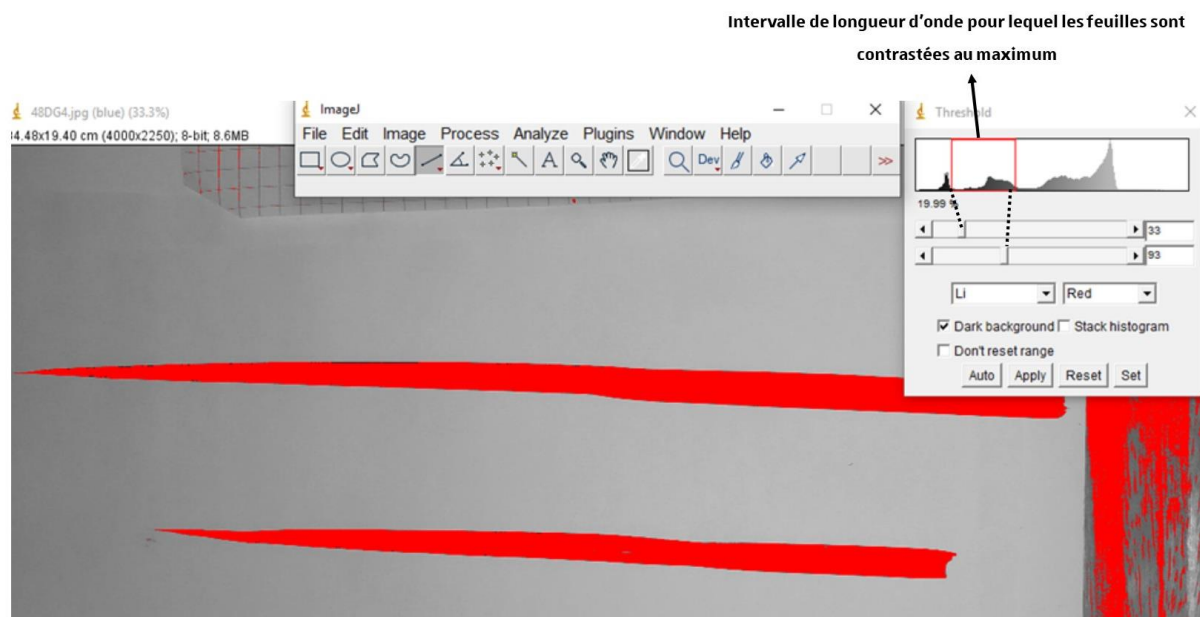
Code indiv	LER	Mesures florales (préciser)	
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Annexe D – Aide visuelle ImageJ

D.1. Capture d'écran du menu Set Scale du logiciel ImageJ.



D.2. Capture d'écran de l'outil de contraste Threshold d'ImageJ



Annexe 3 : Fiche de terrain utilisée pour les mesures de la longueur étirée de reproduction et pour les traits floraux.

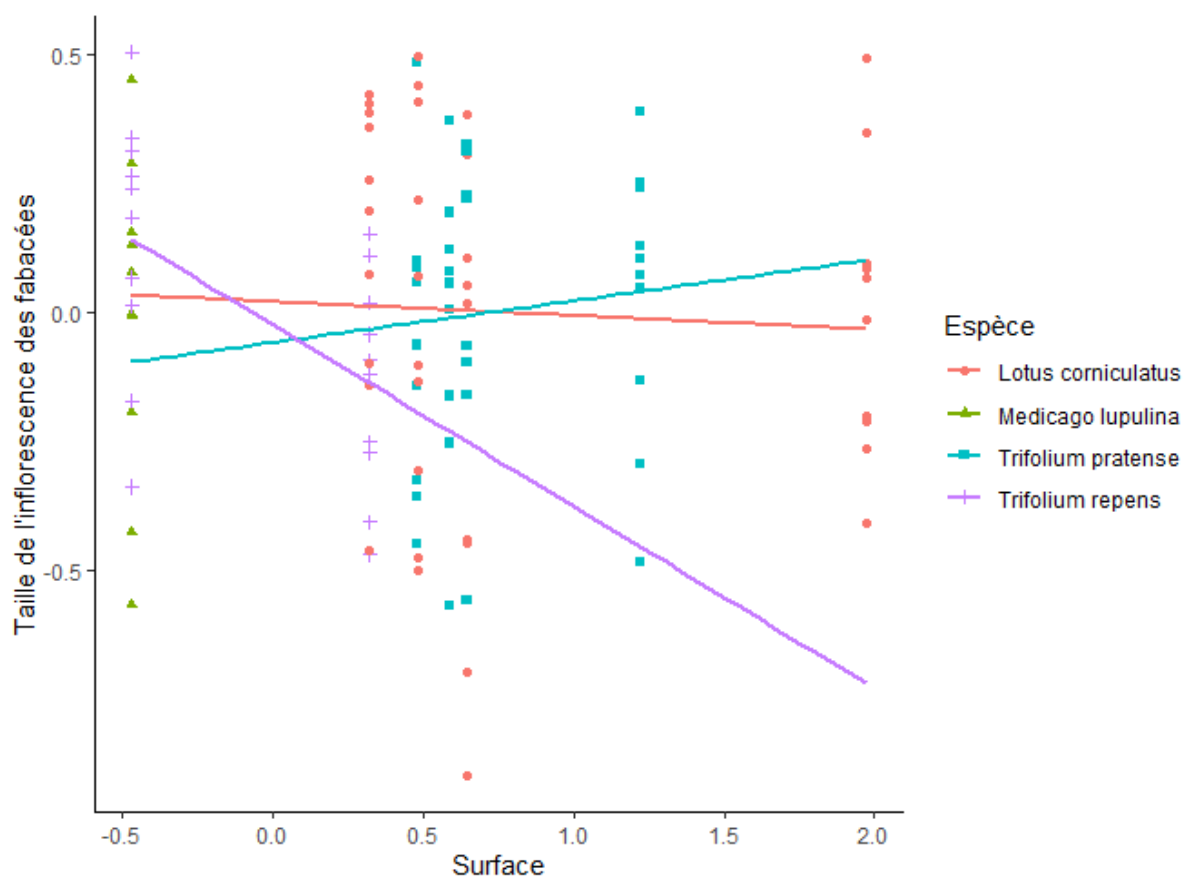
Site :

Date :

Nom sp :

Code indiv	Mesures longueurs		Mesures fleurs (préciser)	
	LEV	LER		
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Annexe 4 : Régression linéaire de la taille des inflorescences des fabacées et fonction de la surface selon les espèces.



RESUME

L'urbanisation provoque des modifications importantes de l'environnement biotique (destruction et fragmentation des habitats, ...) et abiotique (augmentation de la température, du stress hydrique, des pollutions...). Ces pressions s'exercent, entre autres, sur les traits fonctionnels des plantes impactant indirectement leur valeur sélective.

Dans ce mémoire, nous proposons d'étudier la variabilité de trois traits fonctionnels emblématiques (*i.e.* la surface spécifique foliaire, la hauteur de reproduction et la taille des fleurs) au sein et entre espèces en réponse aux différentes formes urbaines et à la gestion appliquée.

Après avoir caractérisé 41 espaces herbacées selon deux gradients paysagers (urbanisation et densification) et un gradient de gestion, nous avons testé la corrélation entre ces gradients et les traits par des modèles mixtes.

Au niveau spécifique, nos résultats montrent un lien néfaste de l'intensité de gestion croisé avec un gradient d'urbanisation pour la surface foliaire et la hauteur de reproduction. Les milieux peu gérés ne sont pas significativement affectés par les pressions d'urbanisation.

Nous n'avons pas mis en évidence de pattern réellement significatif pour les traits floraux au niveau spécifique. Peu d'effets ont été observés pour tous les traits au niveau communautaire ce qui pourrait indiquer un changement de composition spécifique.

Mots-clés : Traits fonctionnels, gestion, urbanisation, flore urbaine

ABSTRACT

Urbanization causes significant changes in the biotic (destruction and fragmentation of habitats, etc.) and abiotic (increase in temperature, water stress, pollution, etc.) environment. These pressures affect functional traits of plants which impact indirectly their selective value. In this study, we propose to examine the variability of three emblematic functional traits (*i.e.* leaf specific surface area, reproduction height and flower size) within and between species in response to different urban forms and to applied management.

After having defined 41 herbaceous spaces according to two landscape gradients (urbanization and densification) and a management gradient, we tested the correlation between these gradients and the traits using mixed models.

At the specific level, our results have a negative link between the intensity of cross-management and an urbanization gradient for leaf area and reproduction height. Low managed areas are not significantly affected by urbanization pressures.

We did not find any really significant pattern for the floral traits at the specific level. Little effect was found for all traits at the community level which could indicate a change in specific composition.

Keywords: Functional trait, management, urbanization, urban flora