



Mémoire de stage

Master 2 Biodiversité, Ecologie et Evolution Parcours Ecologie de la Conservation et Ingénierie Ecologique



Année universitaire 2022-2023



Cimetières Vivants

Etude de la biodiversité dans les cimetières franciliens

Pauline RIDEAU

Stage du 06/02/2023 au 04/08/2023

Soutenu le 28/09/2023

Structure d'accueil : Agence régionale de la biodiversité en Ile-de-France

Encadrants : Jonathan FLANDIN et Hemminki JOHAN

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrants **Jonathan Flandin** et **Hemminki Johan** de m'avoir permis de réaliser ce stage qui fut très enrichissant à la fois professionnellement et personnellement. Merci pour votre bienveillance et la confiance que vous m'avez accordée.

Un grand merci à **Lucile Chéné** sans qui les terrains n'auraient pas eu la même saveur. Merci pour ton soutien et surtout ton amitié, je suis heureuse de t'avoir rencontré.

Je souhaiterais également exprimer ma gratitude envers **Grégoire Lois** pour avoir discuté de mes analyses et apporté un regard différent sur mes résultats, mais aussi pour sa sympathie et sa bonne humeur intarissable.

Merci à mon professeur de statistiques, **Christian Kerbiriou**, d'avoir pris le temps de répondre à mes questionnements dans ce domaine.

Merci à **Léo Kizirian** pour nos discussions autour des statistiques et de R mais aussi pour les nombreuses sessions de SPIPOLL que nous avons partagées.

Je remercie **Ophélie Ricci** pour m'avoir donné bon nombre de conseils en ornithologie lors de mes premiers terrains.

J'aimerais remercier **Mustapha Taqarort** pour son aide en informatique mais aussi pour avoir partagé son bureau avec moi de très nombreuses fois.

Merci à **Eric Grosso** de la Ligue de Protection des Oiseaux pour la formation sur les chants d'oiseaux.

Je tiens enfin à remercier l'équipe de l'ARB pour leur gentillesse et grâce à qui mon stage s'est déroulé mieux que je n'aurais pu l'espérer : **Lucile Dewulf, Olivier Renault, Marc Barra, Gwendoline Grandin, Klaire Houeix, Gabrielle Huart, Gilles Lecuir, Laura Floch, Marjorie Millès, Solène Agnoux, Théo Leclerc, Magali Gorce et Nadine Benkemoun.**

Présentation de la structure :

L'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France

L'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France (ARB ÎdF), anciennement connue sous le nom de Natureparif, a été créée en 2018 grâce à un partenariat solide entre la Région Île-de-France, l'Office français de la biodiversité (OFB) et l'Institut Paris Région (IPR), avec le soutien de l'État et de l'Agence de l'eau Seine-Normandie. Première agence régionale de la biodiversité opérationnelle en France, elle agit comme une plateforme de coopération renforçant les missions de service public de ces organismes. L'ARB ÎdF joue un rôle essentiel dans la préservation des écosystèmes et des espèces présentes en Île-de-France. Son action repose sur plusieurs piliers : la connaissance, la sensibilisation, la gestion et la coordination des initiatives liées à la biodiversité. Elle travaille en partenariat avec de nombreux acteurs, tels que les associations environnementales, les chercheurs, les entreprises et les citoyens.

En tant que déclinaison territoriale de l'OFB, l'ARB ÎdF a pour mission de recenser, étudier et suivre la faune, la flore et les habitats naturels présents sur le territoire francilien et d'identifier les priorités d'actions régionales. Elle œuvre également à sensibiliser le public à l'importance de la biodiversité et aux enjeux qui y sont associés à travers des actions de communication, d'éducation et d'animation. Forte de l'expérience de Natureparif acquise au cours des 10 dernières années, son objectif est de renforcer et d'enraciner durablement l'action en faveur de la biodiversité dans les territoires, tout en contribuant activement à la Stratégie nationale pour la biodiversité (SNB).

Grâce à son rôle d'ingénierie territoriale, l'ARB ÎdF travaille à la promotion et à la dissémination de projets favorables à la biodiversité en Île-de-France. Elle bénéficie des compétences de toutes les équipes de l'Institut Paris Région, notamment dans les domaines de l'aménagement et de l'urbanisme, pour réaliser des diagnostics pertinents et proposer des solutions opérationnelles en faveur de la préservation de la biodiversité dans la région. Ainsi, l'ARB ÎdF s'engage activement dans la protection de la biodiversité en collaboration étroite avec l'OFB et l'ensemble du réseau des Agences régionales de la biodiversité en métropole et en outre-mer.



Sommaire

I.	Introduction.....	2
1.	Déclin de la biodiversité et densification des villes	2
2.	La place de la biodiversité en ville : une vision en évolution	2
3.	Les cimetières : un refuge pour le vivant	3
4.	L'étude « Cimetières Vivants ».....	4
II.	Matériels et Méthodes.....	6
1.	Les cimetières étudiés	6
2.	Conception des variables explicatives.....	6
3.	Création des indices et utilisation des données nationales.....	9
4.	Protocoles et objectifs	10
5.	Tests et modèles statistiques	14
III.	Résultats	16
1.	Résultats de la flore : Vigie-Flore et Sauvages de ma Rue	16
2.	Résultats des oiseaux : EPOC	18
3.	Résultats des petits mammifères terrestres : Mission Hérisson	21
4.	Résultats des chiroptères : Vigie-Chiro.....	23
IV.	Discussion et Conclusion	26
1.	La biodiversité des cimetières	26
2.	Influence des composantes internes et environnantes des cimetières	28
3.	Perspectives d'amélioration des analyses	32
	Références bibliographiques	36
	Acronymes	40
	ANNEXES	41

I. Introduction

1. Déclin de la biodiversité et densification des villes

La biodiversité traverse actuellement une crise sans précédent (Singh, 2002). En effet, nous vivons la sixième extinction de masse (Ceballos *et al.*, 2010) et près d'un million d'espèces est en danger d'extinction, ce qui est 10 à 100 fois supérieur à la moyenne des dix derniers millions d'années (IPBES, 2019). Les principales raisons de ce déclin sont les pressions anthropiques qui ne cessent d'augmenter sur les écosystèmes. Parmi elles, le changement d'occupation des terres représente la première cause du déclin de la biodiversité, en particulier avec l'artificialisation des sols. Cette dernière se traduit en partie par l'expansion urbaine et sa densification qui reste l'une des conséquences de l'accroissement des populations humaines. Effectivement, la population humaine a doublé depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle et atteindrait les 10 milliards en 2050 d'après l'ONU. Cette tendance démographique implique de nouveaux besoins au détriment de la biodiversité et des services associés (Ganivet, 2020). Face à ces phénomènes, il devient urgent de repenser la ville tout en incluant la nature dans son fonctionnement et dans sa conception (Deboeuf De Los Rios *et al.*, 2022).

2. La place de la biodiversité en ville : une vision en évolution

La ville représente un milieu hostile pour l'ensemble de la biodiversité par la multitude de stress qu'elle induit (McKinney, 2002). A titre d'exemple, la fragmentation des habitats et l'imperméabilisation des sols impactent négativement la qualité des services écosystémiques et favorisent le réchauffement en ville. De plus, les pollutions lumineuses et acoustiques perturbent le comportement et la phénologie de nombreuses espèces (Marín-Gómez & MacGregor-Fors, 2021). Ces éléments laissent une place très réduite à la nature dans la ville et, par conséquent, entraînent une perte des services écosystémiques qui jouent pourtant un rôle essentiel dans le contexte actuel du changement climatique. En effet, prendre en compte la biodiversité dans l'écosystème urbain permet de réduire la pollution atmosphérique et sonore et de réguler les eaux pluviales ainsi que les températures (Bolund & Hunhammar, 1999 ; Elmqvist *et al.*, 2015). Au-delà des facteurs environnementaux, conserver et préserver la biodiversité en ville est gage de bénéfice pour l'amélioration de la santé humaine, qu'elle soit physique ou psychique (Collard *et al.*, 2023).

Dans ce contexte, l'écologie urbaine est une discipline essentielle pour la conception et la gestion des espaces urbains (Ramalho & Hobbs, 2012), que ce soit dans la création de néo-

écosystèmes, comme les toitures et murs végétalisés, ou dans la valorisation d'espaces verts déjà existants, comme les parcs, les jardins ou bien les cimetières.

3. Les cimetières : un refuge pour le vivant

Les cimetières occupent une place particulière dans le paysage urbain. Il y a 1 515 cimetières en Île-de-France (MOS 2017), soit 0.2 % de la surface régionale. Lieux de quiétude dédiés au repos des défunts, ils possèdent un important potentiel d'accueil et de refuge pour la biodiversité des villes (Kowarik *et al.*, 2016). En effet, le calme, leur fréquentation moindre, l'absence d'éclairage nocturne et une végétalisation plus ou moins importante en font un lieu propice pour l'accueil de la faune et la flore.

Comme présenté sur la figure 1 ci-dessous, les cimetières sont traditionnellement constitués d'un ensemble d'allées principales et secondaires permettant la circulation pour rejoindre les sépultures. Les tombes sont séparées les unes des autres par un espace de 30 à 50 cm appelé inter-tombes. On retrouve également un espace cinéraire composé d'un jardin du souvenir (pour la dispersion des cendres), un jardin cinéraire et un columbarium (pour le dépôt des urnes). Les prairies peuvent être permanentes ou en attente d'utilisation pour de nouvelles concessions.

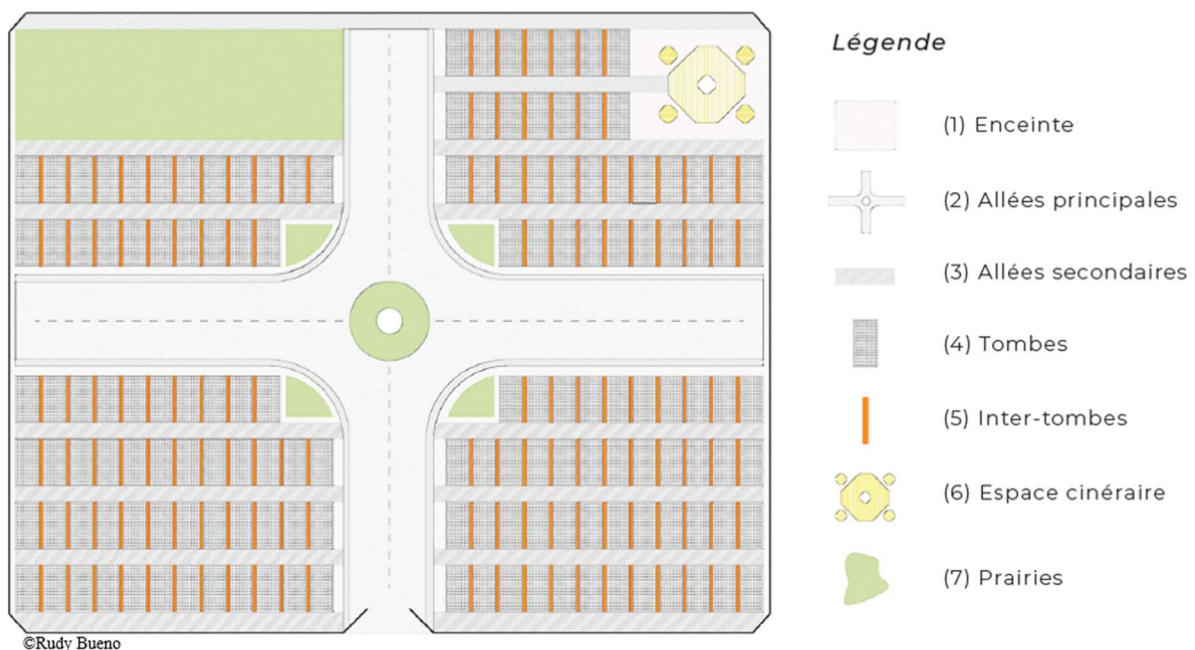


Figure 1 : Représentation schématique d'un cimetière type en France

Les cimetières sont donc des milieux très contraignants dans leur conception avec souvent une forte minéralisation induisant une gestion avec une importante pression de désherbage. En effet,

le développement de la flore spontanée reste mal perçu par les familles car synonyme d'abandon du lieu et, par extension, des défunts. Cependant, des méthodes de conception et gestion existent pour favoriser la biodiversité dans les cimetières telles que l'enherbement des allées, la végétalisation ou encore l'aménagement d'habitats naturels (mare, tas de bois morts...) et artificiels (nichoirs pour les oiseaux, gîtes pour les chauves-souris...) (Flandin, 2022) permettant de concilier les usages et l'accueil de la biodiversité. Il existe également un nouveau type de cimetière dit « paysager » où les surfaces végétales majoritent sur les surfaces minérales. D'autre part, l'utilisation des produits phytosanitaires chimiques est interdite dans les cimetières depuis le 1^{er} juillet 2022 (loi Labbé) obligeant les gestionnaires à changer leurs pratiques notamment pour mieux prendre en compte la végétation spontanée.

4. L'étude « Cimetières Vivants »

En 2020, l'Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France (ARB îdF) lance l'étude « Cimetières vivants ». Cette étude est réalisée sur une durée de 4 ans (de 2020 à 2023) dans le but d'améliorer les connaissances floristiques et faunistiques des cimetières franciliens.

Afin d'avoir une vision globale de la biodiversité pouvant se trouver dans les cimetières, de les comparer entre eux mais aussi à d'autres milieux, le choix des taxons inventoriés et des protocoles associés ont été décidés en s'appuyant sur l'expertise des partenaires scientifiques de l'étude à savoir le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN), la Ligue de Protection des Oiseaux (LPO) et le Conservatoire Botanique National du Bassin Parisien (CBNBP). Les protocoles, issus des sciences participatives, sont les suivants :

- Vigie-Flore (VF) et Sauvages de ma rue (SDMR) pour la flore (www.vigienature.fr/fr/vigie-flore et sauvagesdemarue.mnhn.fr),
- Suivi Photographique des Insectes Pollinisateurs (SPIPOLL) pour les insectes pollinisateurs (www.spipoll.org),
- Estimation des Populations d'Oiseaux Communs (EPOC) pour l'avifaune (www.lpo.fr/la-lpo-en-actions/connaissance-des-especes-sauvages/suivis-ornithologiques/oiseaux-communs/epoc),
- Mission Hérisson (MH) pour les petits mammifères terrestres (missionherisson.org),
- Vigie-Chiro (VC) pour les chiroptères (www.vigienature.fr/fr/chauves-souris).

A partir des données collectées dans le cadre de l'étude « Cimetières vivants », les deux problématiques suivantes émergent : La biodiversité des cimetières est-elle semblable à celles des autres milieux ? Quels sont les paramètres environnementaux ayant un effet sur la biodiversité des cimetières ?

Pour répondre à ces questions, les données exploitées dans ce rapport sont celles recueillies entre 2020 et 2022 pour chaque taxon, à l'exception des insectes pollinisateurs pour lesquels je n'ai pas réalisé les analyses statistiques car elles n'étaient pas prévues cette année.

II. Matériels et Méthodes

1. Les cimetières étudiés

Afin d'obtenir un échantillon représentatif des cimetières présents en Ile-de-France, les sites ont été sélectionnés selon différents critères de diversité. Cette dernière s'exprime en termes de milieux, les cimetières sont répartis sur un gradient allant de l'urbain dense au rural (agricole ou forestier), d'aménagement (paysagers, arborés, enherbés, minéralisés ou mixtes) et de pratiques de gestion (d'une gestion classique, intensive à une gestion plus écologique). La liste des 45 cimetières étudiés est présentée sur la figure 2.

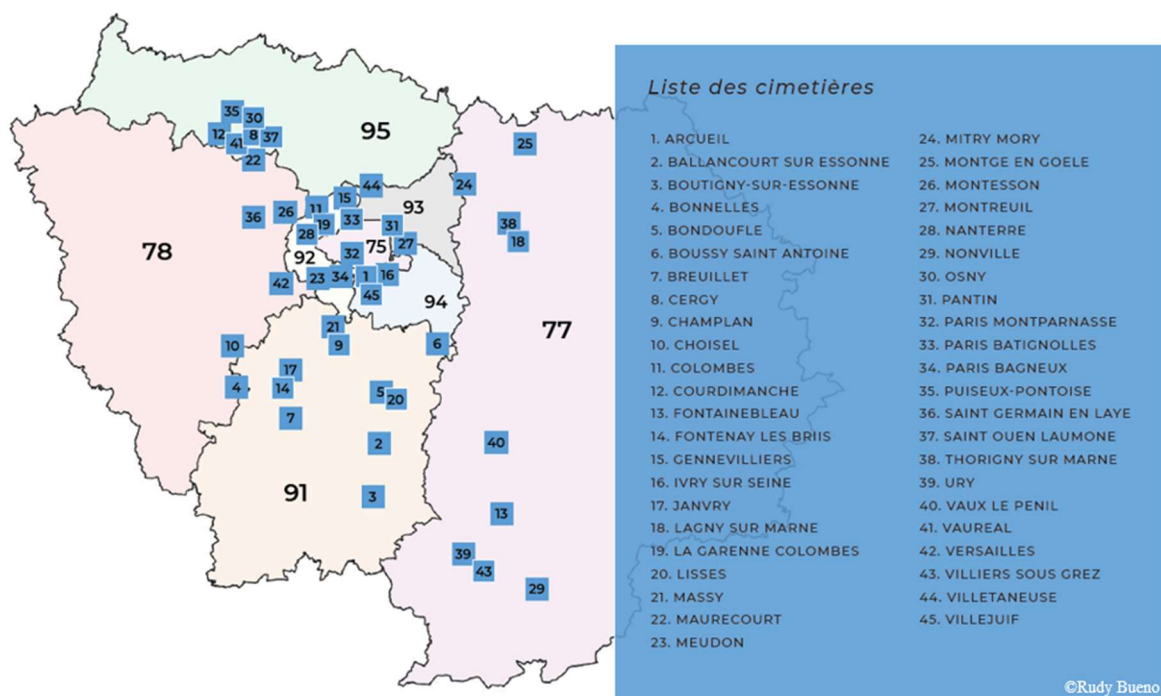


Figure 2 : Carte d'Ile-de-France localisant les cimetières de l'étude

2. Conception des variables explicatives

La conception de variables explicatives fut la première étape afin de tester leurs effets sur les données collectées dans les cimetières et apporter des éléments de réponses à la problématique.

a. Urbanisation et couverture aquatique

La variable urbanisation a été créée à partir du Mode d'occupation du sol (Mos+), cartographie développée par l'Institut Paris Région avec les données de l'inventaire numérique de l'occupation du sol d'Ile-de-France couplée avec la couche cartographique des Espaces Publics. A partir de cet outil, il est possible de sélectionner les différents milieux environnants

les cimetières avec un niveau de précision plus ou moins grand. Pour l'étude, les données du Mos+ 81 postes ont été extraites à l'aide du logiciel ArcGIS dans un buffer de 500 et 1000 mètres autour des cimetières. Les taxons étudiés ont des capacités de dispersion variables qui mènent à la sélection de différents buffers : ils ont été définis à dire d'experts lors d'une réunion entre membres du MNHN, du CBNBP et de la LPO.

Un indice a été construit à partir d'analyse en composantes principales sur 11 postes. Ces 11 catégories ont été projetées sur deux axes mettant ainsi en évidence un gradient d'urbanisation (convergence de certains postes). L'extraction des valeurs sur le premier axe a permis d'obtenir la variable d'urbanisation. Cependant, certaines catégories sont peu représentées dans le jeu de données (notamment milieu naturel), d'où l'utilisation de cet indice.

La variable couverture aquatique a été élaborée afin d'avoir une approche de la trame bleue. La méthodologie est la même que pour la variable urbanisation (Mos+) avec ici la sélection des postes rattachés aux milieux aquatiques. Cet indice correspond au pourcentage de sol occupé par des milieux aquatiques dans un buffer de 500 et 1000 mètres.

b. Végétalisation, hauteur de végétation et nombre d'arbres

Les données utilisées pour la construction des variables végétalisation et hauteur de végétation sont issues d'une cartographie développée par l'Institut Paris Région sur la base du « Normalized Vegetation Index » (NDVI). Le principe est de mesurer la réflectance par satellite des canaux rouges (absorbée par les végétaux) et proche infrarouge (réfléchi par les végétaux). A partir de cela, la soustraction de la bande rouge à la bande infrarouge permet de déduire la végétalisation du site.

De plus, lorsque la part réfléchi est importante, le couvert végétal est considéré comme équivalent à une forêt dense et mature. De ce fait il est possible de déterminer la taille du couvert végétal (herbacée, arbustive ou arborée). Les valeurs de la variable végétalisation proviennent d'une ACP sur laquelle ont été projetés les pourcentages de végétalisation et de surface minérale. Pour la variable hauteur de végétation, il s'agit de la projection du pourcentage des différentes strates mentionnées précédemment.

La variable nombre d'arbres provient du dénombrement des arbres dans les cimetières par satellite à l'aide du logiciel ArcGIS à l'exception des cimetières parisiens pour lesquels la donnée était déjà disponible.

c. Pollution lumineuse

La variable pollution lumineuse a été conçue à partir de la carte « Visible Infrared Imaging Radiometer Suite » (VIIRS, disponible sur www.lightpollutionmap.info). Cette carte collecte les bandes lumineuses visibles et infrarouges émises par la Terre. Cela permet de connaître la radiance émise ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$) dans un rayon de 1 km autour des cimetières. Cette variable est pertinente pour les déplacements de chiroptères.

d. Entomogamie

Il s'agit d'un pourcentage de plantes entomogames présentes dans chaque cimetière. Il est créé à partir des données des inventaires floristiques et des traits floraux associés.

e. Intensivité de gestion et gestion minérale

La variable gestion est un indicateur de l'extensivité de la méthode d'entretien de la végétation dans les cimetières. Elle a été construite en premier lieu par cartographie d'images satellites des cimetières en faisant la distinction entre les espaces minéralisés (allées principales et secondaires) et les espaces enherbés (allées secondaires et/ou espaces de prairie).

La surface minérale d'un cimetière se définit par la somme des surfaces occupées par les espaces minéralisés. La surface enherbée, quant à elle, est égale à la somme des surfaces occupées par les espaces enherbés. La surface totale gérée d'un cimetière est donc la somme des surfaces minérales et enherbées.

En parallèle, un questionnaire à destination des gestionnaires a été réalisé afin de connaître les méthodes de gestion utilisées et les taux horaires associés. Un score de 1 à 5 a été attribué à chaque méthode selon son impact sur la biodiversité (cf. tableau 1 ci-dessous).

Tableau 1 : Tableau des scores associés aux méthodes de gestion selon leur intensivité

Méthode de gestion	Score
Fauche avec exportation	1
Fauche sans exportation	2
Désherbage manuel	2
Débrousailluse	3
Tonte	3
Désherbage mécanique	3
Désherbage thermique	4
Biocontrôle	5

La gestion totale appliquée se calcule de la façon suivante :

$$\text{Gestion totale} = (\text{gestion}_1 \times \text{score}_1) + [\dots] + (\text{gestion}_n \times \text{score}_n)$$

Pour convertir cette gestion totale en extensivité de gestion, la surface totale gérée est divisée par la gestion totale. De ce fait, plus la gestion est intensive, plus l'indice est faible.

La gestion minérale a été calculée avec la même méthode en prenant en compte uniquement les désherbages manuel, mécanique et thermique car ce sont les seules méthodes utilisées en zones minérales.

f. Autres variables

Les variables suivantes ont été créées à partir de formulaires remplis par les gestionnaires des cimetières.

- La variable ancienneté est estimée en faisant le calcul : 2022 - date de création du cimetière.
- La variable surface correspond à la taille en hectares du cimetière.

Concernant la rémanence en herbicides, elle se calcule de la manière suivante : V_{\max} – nombre d'années sans herbicides (avec V_{\max} = valeur max du nombre d'années sans herbicides). Plus la valeur de l'indice est élevée, plus l'arrêt des herbicides est récent et inversement.

g. Préparation des variables aux analyses statistiques

Les variables citées précédemment présentent des disparités en termes d'unités et d'échelles. Afin de faire les analyses statistiques, les variables explicatives ont été mises à une échelle semblable par transformations logarithmiques. Ainsi les indices ont des ordres de grandeur similaires (cf. annexe 1).

3. Création des indices et utilisation des données nationales

a. Création des indices de biodiversité

Pour l'analyse de chaque taxon, les indices de biodiversité suivants ont été calculés :

Richesse : nombre total d'espèces ou morpho-groupes par relevé. Il s'agit de la somme du nombre d'espèces observées pour chaque relevé.

Originalité : originalité moyenne des espèces ou morpho-groupes par relevé. Il s'agit de la moyenne des indices d'originalité de chaque espèce. Les indices d'originalité sont calculés grâce à l'attribution d'un rang pour chaque espèce. Ce rang est attribué en fonction de la fréquence d'apparition de l'espèce : plus le rang est faible, plus l'espèce est fréquente et inversement.

Rareté : rareté moyenne des espèces ou morpho-groupes retrouvés par relevé. Se calcule en faisant la moyenne des indices de rareté attribués à chaque espèce (indices issus de la base de données du CBNBP et de Cettia).

Rareté pondérée : rareté pondérée par l'abondance de chaque espèce.

Abondance : nombre total d'individus observés par espèce ou morpho-groupe par relevé.

Occurrence : nombre de cris enregistrés par une espèce pendant une nuit (s'applique aux chiroptères).

Taux d'activité : taux d'activité moyen par relevé. Il est calculé en faisant la moyenne des taux d'activité de chaque espèce du relevé présente (s'applique aux chiroptères uniquement) et en prenant en compte le jeu de données national. La formule est la suivante : n_i / N_i avec i l'espèce, n le nombre de contacts et N le nombre de contact maximal retrouvé dans le jeu de données national. Il s'agit d'un proxy de l'abondance.

Traits floraux : moyenne des indices de trait attribués à chaque espèce par relevé (données extraites du CBNBP).

b. Sélection des données nationales pour comparaison avec l'étude

Afin de comparer les données de l'étude avec les données nationales, des filtres ont été appliqués aux données nationales. Un premier filtre géographique pour sélectionner les données échantillonnées dans la région Ile-de-France afin de respecter la représentativité du climat francilien. Un deuxième filtre habitat pour conserver uniquement les données échantillonnées dans des habitats correspondants à ceux de l'étude à savoir « territoires agricoles », « territoires artificialisés » et « forêts et milieux semi-naturels » selon la classification Corine Land Cover (CLC). Enfin un filtre phénologique est appliqué pour chaque protocole permettant de garder les données collectées sur les dates des échantillonnages (et heures pour EPOC) de l'étude afin de respecter une phénologie comparable des espèces.

4. Protocoles et objectifs

a. Analyse de la flore : Vigie-Flore et Sauvages de ma rue

La flore des cimetières est inventoriée à l'aide de deux protocoles : Vigie-Flore (VF) pour les espaces prairiaux et Sauvages de ma rue (SDMR) pour les zones inter-tombales. L'application du protocole VF dans le cadre de l'étude consiste à disposer une placette de 10 m² dans un des espaces enherbés du cimetière et à noter l'ensemble des espèces présentes. Concernant SDMR, un transect de 100 mètres entre les tombes et les allées secondaires est

défini. L'ensemble de la flore spontanée et subsponnée observée le long de ce dernier est relevé. Les placettes et les transects sont placés au même endroit chaque année. Les relevés flore sont réalisés par les botanistes du CBNBP, ils ont lieu 1 fois par an à partir du 15 mai à l'exception de 2023 où seul un inventaire au début de l'automne (septembre-octobre) sera réalisé afin de compléter les observations réalisées au printemps, démarche complémentaire pour contacter les cortèges plus tardifs. Cela permet d'avoir une représentation plus fine des communautés floristiques présentes dans les cimetières entre les saisons.

Les objectifs sont de calculer les richesses, raretés et originalités floristiques moyennes par cimetière chaque année pour chaque milieu (prairie et inter-tombe), puis de comparer ces indicateurs entre les données de l'étude et les données nationales pour des milieux similaires (urbain, agricole ou naturel). Dans un second temps, les objectifs sont d'étudier les effets des différentes variables explicatives sur les indicateurs précédemment cités et sur les traits floraux retrouvés dans les cimetières. Les traits floraux étudiés sont ceux liés à la lumière, la température, à l'humidité édaphique et atmosphérique et à la nitrophilie.

b. Analyse des oiseaux : EPOC

L'Estimation des Populations d'Oiseaux Communs (EPOC) est une version simplifiée du protocole Suivi temporel des oiseaux communs par échantillonnage ponctuel simple (STOC-EPS) permettant de calculer des tailles de population et les tendances démographiques des oiseaux communs. Pour l'étude, ce protocole a débuté en 2021 soit 1 an après les autres protocoles.

Pour chaque cimetière, l'observateur choisit un point d'écoute d'une durée de 5 minutes réalisé deux fois sur un même passage, durant lesquels il note l'ensemble des espèces entendues et/ou vues, le nombre d'individus, le statut (mâle chanteur, mâle, femelle...) et la classe de distance (voir la fiche de relevé exemple en annexe 4). Exception pour les cimetières de plus de 10 hectares (Villetaneuse (93), Montparnasse (75) et Versailles (78)), où 2 points d'écoute sont réalisés ; et pour le cimetière parisien de Bagneux (92) (plus de 60 hectares), pour lequel 6 points d'écoute sont effectués. Ces multiplications de points permettent de couvrir plus largement la surface de ces cimetières, ayant ainsi une pression d'échantillonnage comparable entre les sites. Ce protocole est réalisé en deux passages par an : un premier entre le 1^{er} avril et le 8 mai et un second entre le 9 mai et le 15 juin avec au minimum 4 semaines d'écart entre chaque passage. Les relevés se font le matin entre 7h30 et 10h30.

Les objectifs sont de calculer les abondances moyennes et les richesses, raretés et originalités en espèces par cimetière et par an, de comparer ces indicateurs avec les données nationales pour des milieux similaires (urbain, agricole ou naturel) et enfin d'étudier les effets des variables explicatives sur les indices précédemment cités.

c. Analyse des petits mammifères terrestres : Mission Hérisson

Mission Hérisson est un protocole visant à inventorier les petits mammifères terrestres via l'utilisation de tunnel à empreintes. Ces tunnels sont déposés dans les cimetières par les gestionnaires cinq nuits consécutives, deux fois par an. Le dispositif du tunnel à empreintes est détaillé sur la figure 3. Les feuilles de relevés d'empreintes disposées dans les tunnels sont relevées tous les jours pendant la session et envoyées à l'ARB ÎdF pour identification. La première session a lieu du 15 juin au 31 juillet, la seconde du 15 août au 30 septembre avec au minimum 6 semaines d'écart entre chaque passage.

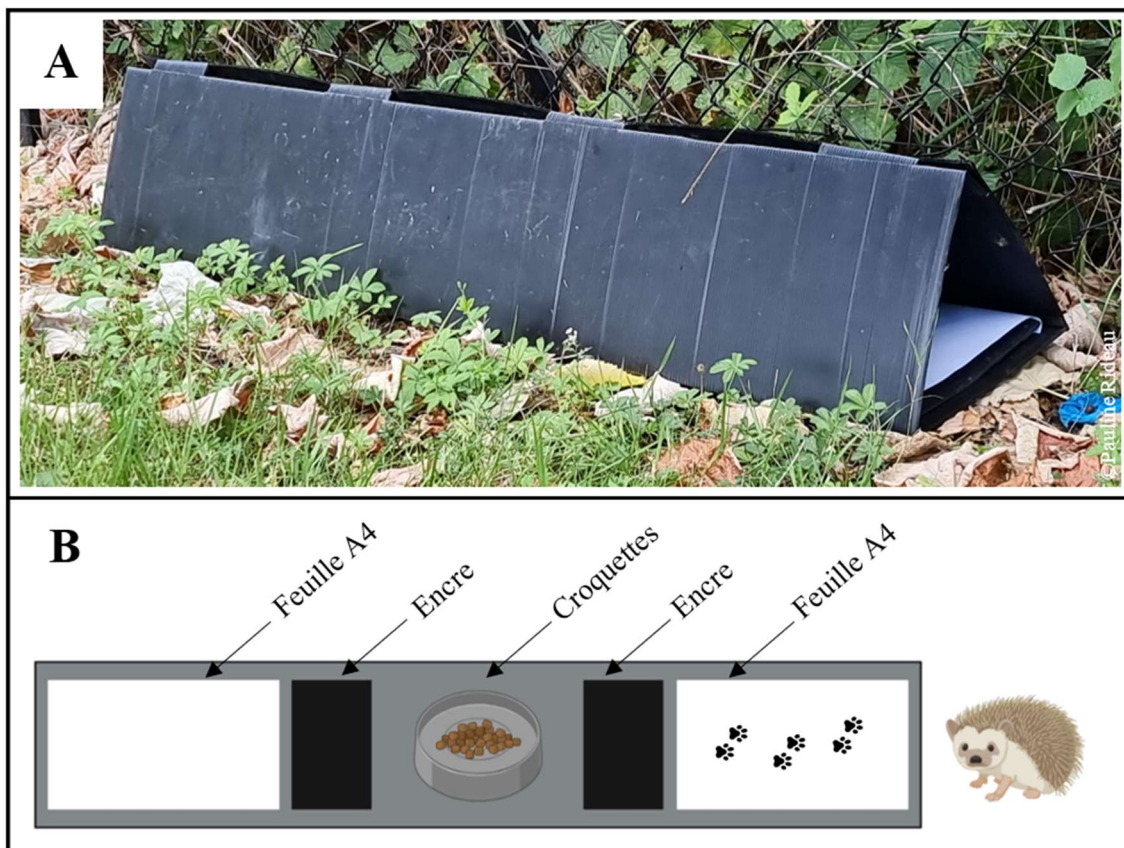


Figure 3 : Tunnel à empreintes : vu de l'extérieur (A) et schéma de l'intérieur (B)

Les objectifs sont de calculer l'abondance totale en petits mammifères et par morpho-groupe pour chaque cimetière par an, de comparer les résultats avec les données nationales pour

des milieux similaires (urbain, agricole ou naturel) et d'étudier l'effet des variables explicatives sur l'abondance en mammifères dans les cimetières. Une seconde partie vise à tester si la présence de chat dans les cimetières a un impact sur la présence de micromammifère et plus particulièrement sur la présence de hérisson.

d. Analyse des chiroptères : Vigie-Chiro

Le protocole Vigie-Chiro consiste à détecter la présence de chiroptères par l'enregistrement d'ultrasons. Les détecteurs (AudioMoths) sont posés dans les cimetières une nuit deux fois par an : la première nuit d'enregistrement a lieu entre le 15 juin et 31 juillet, la seconde entre le 15 août et 30 septembre avec au minimum 4 semaines d'écart entre chaque passage. Une fois les enregistrements effectués, ils sont analysés par un logiciel (Tadarida) et validés par un spécialiste. Le dispositif est présenté en figure 4 ci-dessous.

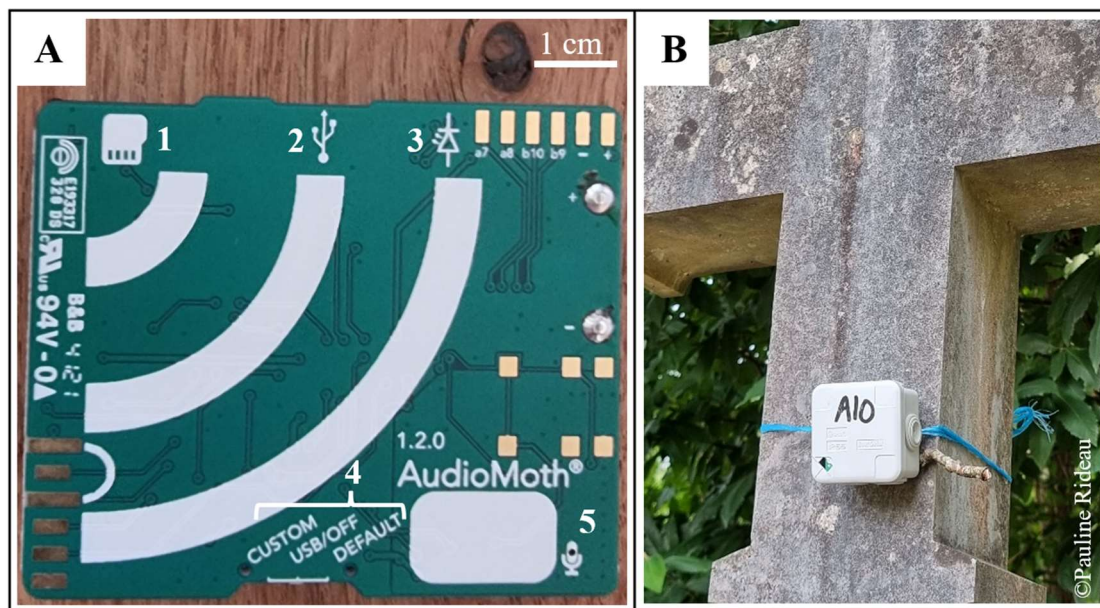


Figure 4 : AudioMoth (A) (1 = carte micro SD ; 2 = connexion SD ; 3 = lumière témoin ; 4 = commutateur et 5 = micro) et photographie de l'installation de l'AudioMoth sur une tombe (B)

Les objectifs sont de calculer les richesses, raretés, raretés pondérées, occurrences et taux d'activité moyens par cimetière et par an, de comparer ces indices avec les données nationales pour des milieux similaires (urbain, agricole ou naturel) et de tester les effets des variables explicatives sur ces indices. D'autre part, pour l'analyse par espèces, seules la Pipistrelle commune, la Pipistrelle de Kuhl, la Noctule commune et la Sérotine commune ont été étudiées car les autres espèces présentes dans les cimetières ne disposent pas d'un jeu de données suffisamment fourni pour faire des analyses et des modèles statistiques.

e. Analyse des insectes pollinisateurs : SPIPOLL

Le Suivi Photographique des Insectes Pollinisateurs (SPIPOLL) consiste à choisir une espèce de fleur et prendre en photographie tous les insectes s'y posant pendant 20 minutes. Ce protocole est réalisé deux fois par an avec une première session entre le 1^{er} avril et le 15 mai puis une seconde entre le 15 juin et le 31 juillet. Pour chaque session, quatre relevés sont faits par cimetière dont deux en inter-tombe et deux en espaces prairiaux. L'analyse des données SPIPOLL n'était pas prévue cette année.

5. Tests et modèles statistiques

L'ensemble des analyses statistiques ont été réalisés sur le logiciel R (version 4.2.3).

a. Méthode pour les analyses de comparaison des milieux

La comparaison des indices entre les données de l'étude et les données nationales est faite avec un test de comparaison de moyenne non paramétrique (test de Wilcoxon). Avec ce test, sous H0 (p-value < 0.05), il existe une différence significative entre les cimetières et les données nationales. Sous H1 (p-value > 0.05), il n'existe pas de différence significative. Ce test est également utilisé pour la comparaison des indices par milieux (CLC).

b. Méthode pour les modèles linéaires généralisés (GLM)

Les effets des variables explicatives sur les indices de biodiversité sont analysés par modèles linéaires généralisés (GLM). La première étape consiste à choisir les variables à inclure dans le modèle. Il faut qu'elles soient propres, indépendantes, peu nombreuses et homogènes en termes de grandeur et variances. L'indépendance est vérifiée par un test de corrélation : à partir d'un coefficient de 0.7, on considère les variables comme trop corrélées (Dormann *et al.*, 2013). La matrice de corrélation ainsi que les relations entre variables corrélées sont présentées en annexes 2 et 3. D'autre part, le nombre de variables par rapport au nombre de données ne doit pas excéder les 10% : dans le cas d'un excédent, les variables sont sélectionnées par partition hiérarchique. Le choix de la loi dépend de la nature de la variable à expliquer : gaussienne lors d'une distribution normale et poisson pour les données de comptage.

L'étape de la sélection des variables commence par la construction d'un modèle complet comprenant l'ensemble des variables pertinentes pour le taxon étudié, tout en veillant à ne pas surparamétrer le modèle. L'adéquation du modèle avec le choix de la loi est vérifiée grâce au rapport entre « residual deviance » et « degrees of freedom » (facteur de 1,5 environ). En cas

de sur dispersion, cela peut être atténués par le changement de la loi en une négative binomiale. La suppression des variables non significative (p -value > 0.05) se fait par sélection descendante, c'est-à-dire qu'on retire une par une les variables les moins significatives du modèle. Le modèle conservé est celui ayant le plus petit AIC (critère d'information d'Akaike).

Enfin les résidus sont vérifiés avec le package DHARMA qui teste l'uniformité et la dispersion des résidus, et les outliers. Il est également important de regarder les « vifs » du modèle afin de détecter d'éventuels problèmes de colinéarité (non négligeable car de nombreuses variables ont des coefficients de corrélation compris entre 0.5 et 0.7). Le pouvoir explicatif du modèle est évalué grâce au R^2 de Nagelkerke.

c. Méthode pour les modèles linéaires généralisés mixtes (GLMM)

Les modèles mixtes consistent à associer des effets fixes et des effets aléatoires. Ces effets aléatoires sont utilisés pour spécifier une structuration spatiale ou temporelle dans le jeu de données. La première étape est la même que pour un GLM classique, il faut cependant vérifier en plus que les effets aléatoires ont une distribution normale et sont indépendants dans chaque groupe. Contrairement aux GLM classiques, la sélection des variables ne se fait pas par sélection descendante : on écrit tous les modèles possibles puis on garde celui avec le meilleur AIC. Pour cela, la méthode du « Model averaging » (package MuMIn) pour implémenter tous les modèles possibles et faire la moyenne pondérée des « estimate » est utile. Les conditions d'applications sont vérifiées comme pour les GLM classiques. Pour connaître le pouvoir explicatif du modèle, on regarde le R^2 conditionnel et le R^2 marginal. Le premier décrit la proportion de variance expliquée par les facteurs fixes et aléatoires et le second, la proportion de variance expliquée par les facteurs fixes uniquement.

d. Méthode pour le « zero inflated model » (ZI models)

Certains jeux de données de comptage présentent un nombre trop important de zéro pour une loi de Poisson classique (notamment pour Mission Hérisson). Ces zéros proviennent soit de l'absence du taxon (vrai zéro) ou d'un problème de détection (faux zéro). Au-delà de 70% de zéro dans le jeu de données, il est préférable de faire un modèle zéro enflé (Martin *et al.*, 2005) : ces modèles ont de meilleurs résultats pour les estimations d'occurrence et d'abondance que les modèles classiques tout en prenant en compte les faux zéros (Wenger & Freeman, 2008). Pour Mission Hérisson, 52% des données sont des zéros. C'est la raison pour laquelle GLM classiques et modèles zéro enflé sont réalisés. Le test de Vuong permet de conclure sur le meilleur modèle.

III. Résultats

1. Résultats de la flore : Vigie-Flore et Sauvages de ma Rue

a. Données et vue globale

Les données utilisées dans le cadre de l'étude correspondent aux individus inventoriés entre 2020 et 2022 : cela correspond à 8 557 données floristiques dont 2 847 pour le protocole VF et 5 710 pour SDMR sur un total de 135 relevés. Concernant les données nationales, cela représente 2 980 données sur 479 relevés pour VF. Les données SDMR n'ont pas été utilisées en raison d'un changement de protocole pour l'étude. En effet, les botanistes ne se sont pas restreints aux espèces du protocole SDMR initial, rendant la comparaison avec les données nationales impossible.

Sur les trois ans d'inventaires, 513 espèces ont été recensées sur l'ensemble des cimetières. L'espèce la plus courante quel que soit le milieu est la Porcelle enracinée (*Hypochaeris radicata*), plantes affectionnant les champs, les pelouses et les milieux sableux. Elle est présente dans l'ensemble des cimetières. Pour les zones de prairie, il s'agit du Dactyle aggloméré (*Dactylis glomerata*), une Poacée de prairie présente dans 39 cimetières, et pour les inter-tombes, de la Fétuque queue-de-rat (*Vulpia myuros*), une Poacée halophyte de sols sablonneux présente dans l'ensemble des cimetières. Parmi les espèces trouvées, certaines sont classées « en danger critique » d'après la liste rouge régionale comme la Berle des blés (*Sison segetum*) vue à Breuillet (91) et la Véronique à feuilles d'acinos (*Veronica acinifolia*) vue à Ivry-sur-Seine (94). La flore retrouvée en inter-tombe et en prairie reste relativement similaire (cf. annexe 5).

En 2020, en moyenne 86 espèces ont été recensées par cimetière et 89 en 2021 et 2022. Le cimetière ayant la richesse floristique la plus élevée est le cimetière de Montreuil (93) avec 111 espèces en moyenne. Au contraire, le cimetière de Cergy (95) est celui avec la richesse floristique la plus faible avec 58 espèces en moyenne. Le détail des richesses par cimetière et par an se trouve en annexe 6.

b. Comparaison des milieux

L'ensemble des indices calculés, à savoir la richesse, la rareté et l'originalité floristique, est significativement différente entre les cimetières et les autres milieux à l'exception de la rareté en milieu urbain.

Les cimetières ont une flore plus riche et plus rare que les autres milieux quel que soit le milieu considéré (sauf pour la rareté en milieu urbain qui n'est pas significative) (cf. figures 5 A et B).

Concernant l'originalité floristique, la flore retrouvée est plus originale dans les cimetières que dans les milieux agricoles et tous milieux confondus (global). A l'inverse la flore est moins originale dans les cimetières en milieu urbanisé, naturel et semi-naturel (cf. figure 5 C).

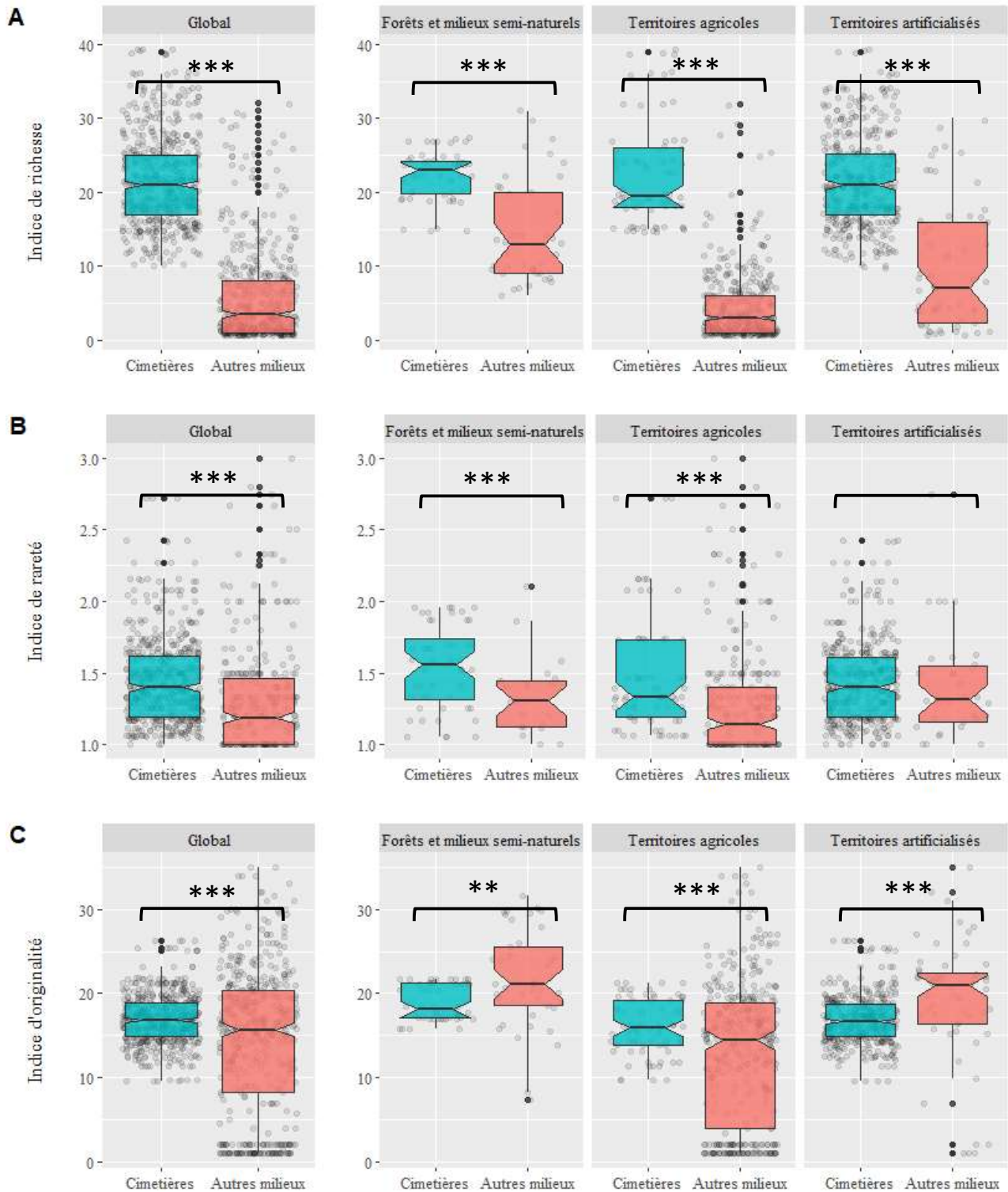


Figure 5 : Comparaison des indices de richesse (A), rareté (B) et originalité (C) floristiques entre les cimetières et les autres milieux en Ile-de-France (p -value $< 0.001 = ***$; p -value $< 0.01 = **$)

c. Effets des variables explicatives

Lors de l'analyse des effets des variables environnementales sur les indices floristiques, il est apparu qu'il y avait une structuration dans le jeu de données du fait d'un biais observateur. C'est la raison pour laquelle des GLMM ont été réalisés en ajoutant un effet aléatoire sur la variable « observateur ».

Pour la richesse floristique, les modèles ont mis en évidence des effets significatifs des variables « urbanisation » et « nombre d'arbres ». Que ce soit dans le cimetière sans distinction de zone, en inter-tombe ou en zones prairiales, l'urbanisation a un effet négatif sur les richesses floristiques. Concernant la variable « nombre d'arbres », elle a un effet positif sur la richesse globale et celle en inter-tombe. A l'inverse, elle a un effet négatif en zones prairiales.

La rareté floristique globale et en inter-tombe est expliquée par la variable « ancienneté » qui a un effet positif significatif. En zones prairiales, ce sont les variables « gestion » et « urbanisation » qui ressortent, ayant toutes deux un effet négatif sur la rareté. Cependant les R^2 de ces modèles sont trop bas pour confirmer ces résultats.

Concernant l'originalité floristique globale, les variables « ancienneté » et « rémanence en herbicides » ont un effet positif significatif. En inter-tombe et en zones prairiales, c'est la variable « végétalisation » qui ressort avec un effet positif significatif. Cependant, comme pour la rareté, les R^2 de ces modèles sont trop bas pour valider ces résultats.

Pour l'analyse des traits floraux, les variables « nombre d'arbres » et « urbanisation » ont un effet positif sur l'ensemble des traits étudiés (héliophilie, thermophilie, nitrophilie, humidités atmosphérique et édaphique). La variable « végétalisation » a un effet négatif sur les traits liés à la lumière et à la température et un effet positif sur les traits associés à l'humidité atmosphérique. La variable « ancienneté » a un effet négatif sur les traits liés à l'humidité atmosphérique, édaphique et à la nitrophilie.

Les tableaux récapitulatifs des modèles et les correspondances aux traits floraux se trouvent en annexes 7, 8 et 9.

2. Résultats des oiseaux : EPOC

a. Données et vue globale

Entre 2021 et 2022, 3 515 données sur l'avifaune ont été notées dans le cadre de l'étude sur 332 relevés (166 sessions). Cependant tous les cimetières n'ont pas pu être échantillonnés

chaque année (1 cimetière manquant en 2021 et 8 en 2022). Concernant les données nationales, le nombre de données utilisées est de 7 206 pour 616 relevés.

Sur les deux premières années d'inventaire, 74 espèces ont été vues et/ou entendues dans les cimetières (contre 127 au total sur l'ensemble de l'Ile-de-France). Les espèces les plus courantes de l'étude sont le Pigeon ramier (*Columba palumbus*) (figure 6A) et le Merle noir (*Turdus merula*) (figure 6B) présents respectivement dans 44 et 43 cimetières. Parmi les espèces détectées, certaines sont catégorisées « en danger » d'après la liste rouge régionale des oiseaux nicheurs comme le Gobemouche noir (*Ficedula hypoleuca*), présent au cimetière de Bagneux (92) ou encore le Serin cini (*Serinus serinus*), retrouvé dans 12 cimetières ; d'autres sont classées rares comme la Huppe fasciée (*Upupa epops*) (figure 6C) ou peu communes comme le Grosbec casse-noyaux (*Coccothraustes coccothraustes*) en Ile-de-France d'après la LPO. Ces derniers ont été vus à Bonnelles (78) pour la Huppe et à Gennevilliers (92) pour le Grosbec.

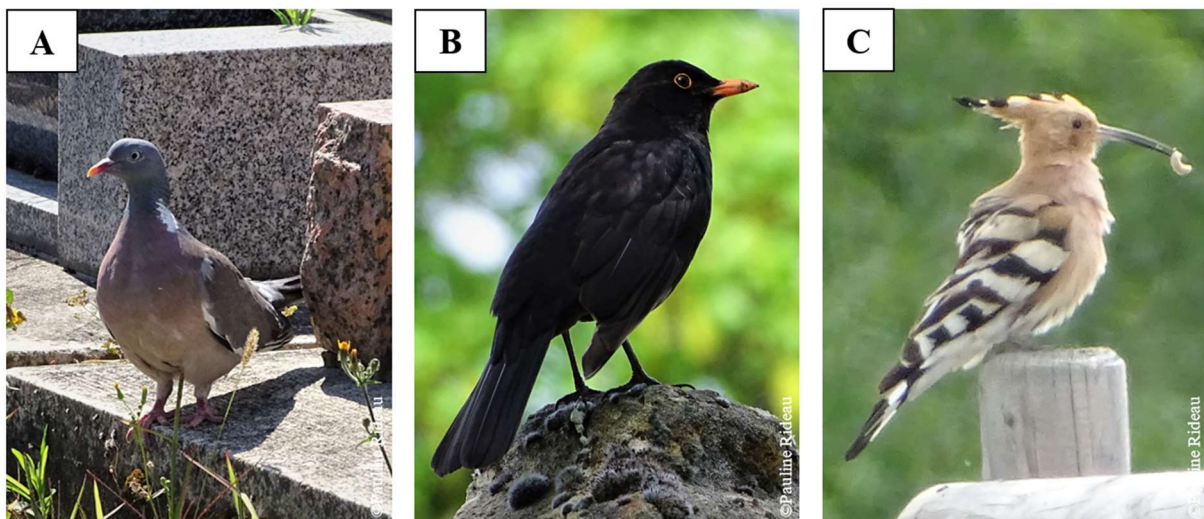


Figure 6 : Photographies d'un pigeon ramier au cimetière d'Arcueil (94) (A), d'un merle noir au cimetière de Paris Montparnasse (75) (B) et d'une huppe fasciée au cimetière de Bondoufle (91) (C)

Chaque année, la richesse totale moyenne observée par cimetière est de 18 espèces. Le cimetière ayant la richesse la plus grande est celui de Nonville (77) avec 33 espèces vues et/ou entendues sur l'année 2022. Cependant certains relevés étant manquants, des moyennes par relevés ont été calculées afin de comparer les cimetières entre eux. En 2021, la richesse moyenne la plus élevée a été obtenue au cimetière de Champlan (91) avec 19 espèces et la plus faible à La Garenne-Colombe (78) avec 4 espèces. En 2022, la richesse moyenne la plus élevée a été trouvée au cimetière de Fontainebleau (77) (18 espèces) et la plus faible au cimetière de Montesson (78) (5 espèces).

b. Comparaison des milieux

Parmi l'ensemble des indices calculés pour l'avifaune des cimetières et des autres milieux franciliens, les tests de comparaison de moyennes ont mis en évidence des différences significatives pour l'originalité et la rareté.

La rareté est significativement différente en milieu agricole ($p\text{-value} = 0.024$), naturel et semi-naturel ($p\text{-value} = 0.018$) et tout milieu confondu ($p\text{-value} = 0.003$). Dans les trois cas, la rareté est plus importante dans les autres milieux que dans les cimetières.

Concernant l'originalité, entre les cimetières de l'étude et les autres milieux, il y a une différence fortement significative en milieu agricole ($p\text{-value} = 1.7\text{e-}07$), où l'originalité est plus élevée dans les autres milieux. Il en est de même en milieu urbain ($p\text{-value} = 4.4\text{e-}08$) mais l'originalité est cette fois-ci plus importante dans les cimetières (cf. figure 7).

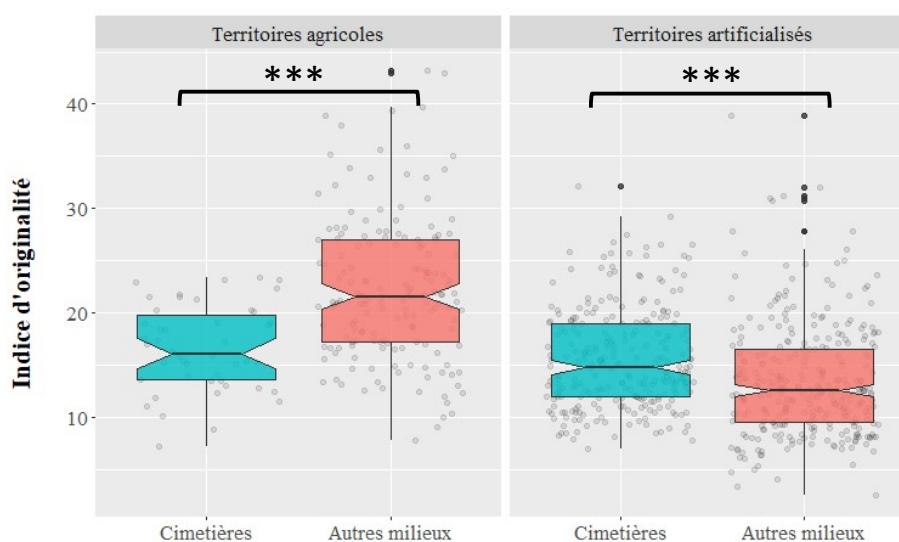


Figure 7 : Indice d'originalité des oiseaux retrouvés dans les cimetières et les autres milieux en Ile-de-France en territoires agricoles et artificialisés de 2021 à 2022 ($p\text{-value} < 0.001 = ***$)

c. Effets des variables explicatives

L'analyse des effets des variables explicatives sur les indices de biodiversité par GLM ont montré des significativités. La variable « hauteur de végétation » a un effet négatif sur la richesse, la rareté et l'originalité en oiseaux dans les cimetières. A l'inverse, la variable « végétalisation » a un effet positif sur la richesse et la rareté. La rémanence en herbicides quant à elle un effet négatif sur l'originalité. Aucun effet des variables explicatives n'a été mis en évidence pour l'abondance.

Le tableau récapitulatif des modèles ainsi que les graphiques associés sont en annexes 10 et 11.

3. Résultats des petits mammifères terrestres : Mission Hérisson

a. Données et vue globale

Entre 2020 et 2022, 1 259 données ont été collectées pour l'étude avec 605 relevés d'empreintes (dont 234 traces de hérissons) et 654 feuilles sans empreintes, soit 52%. Sur les 270 sessions de prévisions, seules 238 ont été réalisées. Concernant les données nationales : 1 704 données avec 796 relevés d'empreintes (dont 586 de hérissons) et 908 feuilles vierges, soit 53%.

Parmi les 11 morpho-groupes de mammifères proposés par le protocole, 6 ont été identifiés dans les cimetières à savoir les hérissons, les chats domestiques, les micromammifères (mulots, musaraignes et campagnols), les rats, les fouines/martres et les belettes/hermines. La présence de hérissons dans les tunnels a été mise en évidence dans 31 cimetières (234 traces) et celle de chats domestiques dans 36 cimetières sur 45 (189 traces). Le morpho-groupe belette/hermine a été détecté une seule fois au cimetière de Courdimanche (95) en 2020.

Du fait des sessions manquantes, la comparaison des cimetières a été faite en passant par la moyenne du nombre de passages de petits mammifères (hors chats) par session de 5 nuits. Le cimetière de Nanterre (92) est celui avec le nombre de passages le plus élevé avec 7 passages en moyenne en 2022.

b. Comparaison des milieux

L'abondance en hérisson est significativement différente entre les cimetières et les autres espaces en milieu urbain (p -value = 0.0002), en milieu naturel et semi-naturel (p -value = 0.0159) et tout milieu confondu (p -value = 1.1e-06). Les abondances sont, dans les trois cas, moins élevées dans les cimetières.

Comme pour le hérisson, il existe une différence significative pour les micromammifères dans les milieux urbanisés (p -value = 0.0032), naturels et semi-naturels (p -value = 0.0019) et tout milieu confondu (p -value = 3.0e-05). Cependant les abondances sont cette fois-ci plus élevées dans les cimetières. Concernant l'abondance totale en petits mammifères terrestres, elle ne diffère pas entre les cimetières et les autres milieux.

c. Effets des variables explicatives

Comme expliqué dans le matériel et méthodes, le jeu de données comporte un très grand nombre de zéro : pour l'abondance totale, plus de 60 sont de zéro (environ 48 % des abondances

calculées) et plus de 90 pour l'abondance en hérisson (72%) (cf. annexe 12). De ce fait, GLM classiques et ZI modèles ont été construits pour tester les effets des variables explicatives.

Pour l'abondance totale, la variable « hauteur de végétation » a un effet significativement positif et la variable « végétalisation » un effet significativement négatif. Ces deux variables ressortent à la fois avec le GLM et le ZI modèle. Cependant le pouvoir explicatif obtenu avec le GLM est faible ($R^2 = 8.5 \%$), de plus le test de Vuong indique que le ZI modèle est meilleur.

Concernant l'abondance en hérisson, les mêmes variables ne ressortent pas pour les deux modèles. Avec le GLM, les variables « hauteur de végétation » et « nombre d'arbres » sont significatives avec un effet positif et la variable « végétalisation » avec un effet négatif. Avec le ZI modèle, seule la variable « végétalisation » ressort, toujours avec un effet négatif sur l'abondance en hérisson dans les cimetières. Ici le test de Vuong indique aussi que le ZI modèle est meilleur. Le tableau récapitulatif des modèles et les graphiques associés se trouvent en annexes 13 et 14.

d. Relation chats et hérissons

Il n'y a pas de relation significative entre la présence de chat et la présence de hérisson dans les cimetières (cf. figure 8A). Dans les autres milieux, il existe au contraire un effet négatif significatif de la présence de chat.

Pour l'abondance totale de petits mammifères (sans les hérissons) dans les cimetières, la présence de chat dans les cimetières a un effet significatif négatif sur cette dernière (cf. figure 8B).

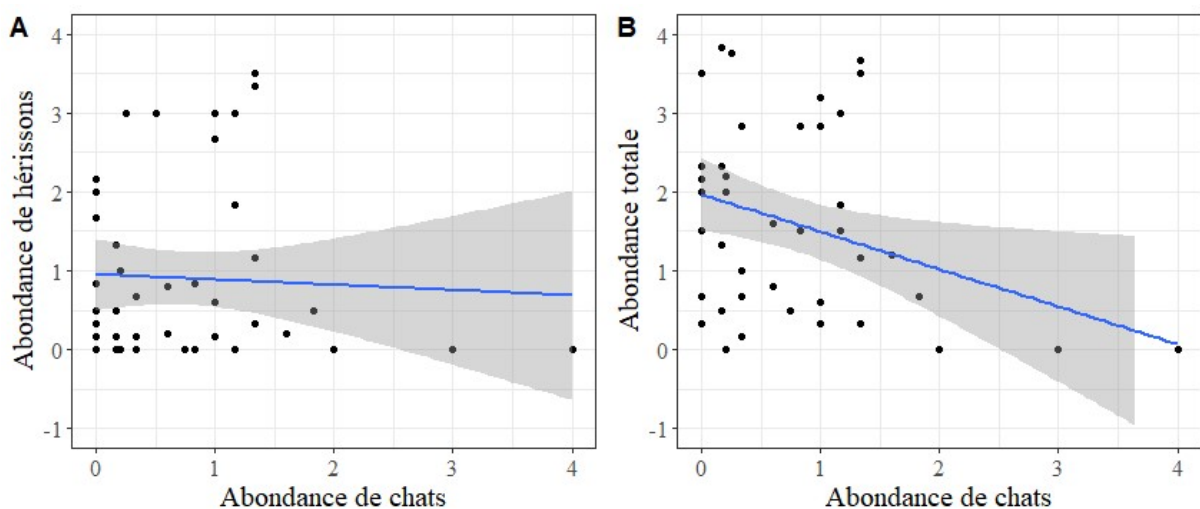


Figure 8 : Abondance de hérisson (A) et abondance totale de mammifères terrestres (hors hérissons) (B) en fonction de l'abondance des chats dans les cimetières

4. Résultats des chiroptères : Vigie-Chiro

a. Données et vue globale

Entre 2020 et 2022, 873 données ont été collectées dans le cadre de l'étude sur 202 sessions (68 sessions manquantes). Pour les données nationales, 10 588 données ont été collectées sur 1 794 sessions d'enregistrement.

Sur les trois ans de suivis, 16 espèces de chiroptères ont été détectées dans les cimetières dont une « en danger critique » : la Barbastelle d'Europe (*Barbastella barbastellus*), présente dans 5 cimetières (Ury, Nonville et Villiers-sous-Grez (77), Meudon (92) et Breuillet (91)) ; et deux « en danger » : le Petit rhinolophe (*Rhinolophus hipposideros*) et le Murin de Daubenton (*Myotis daubentonii*) d'après la liste rouge régionale. Le Petit rhinolophe a été détecté uniquement au cimetière de Puiseux-Pontoise (95) et le Murin de Daubenton dans 18 cimetières. L'espèce la plus courante est la Pipistrelle commune (*Pipistrellus pipistrellus*) détectée au moins une fois dans tous les cimetières de l'étude.

Le cimetière ayant la plus grande richesse est celui de Nonville (77) avec un total de 14 espèces présentes lors de la première session de 2020. Cependant il est difficile de comparer tous les cimetières ensemble du fait des nombreuses sessions manquantes.

b. Comparaison des milieux

Parmi l'ensemble des indices calculés pour les chiroptères, seules la rareté et la rareté pondérée sont significativement différentes entre les cimetières et les autres milieux (p-values = 3.5e-05 et 0.008). Ces deux indices sont plus élevés dans les cimetières.

En milieu artificialisé, la rareté et la rareté pondérée sont toujours significativement supérieures dans les cimetières (p-values = 2.7e-05 et 0.013) et à cela s'ajoute la richesse, significativement plus grande dans les cimetières (p-value = 0.031). L'activité des chiroptères est significativement plus importante dans les cimetières (p-value = 0.015), ce qui n'est pas le cas tout milieu confondu.

Concernant l'analyse par espèce, seule la Pipistrelle de Kuhl présente des différences significatives entre les cimetières et les autres milieux. En effet, son activité et son occurrence sont plus importantes dans les cimetières (p-values = 0.001). Cette significativité ressort également en milieu artificialisé (p-values = 0.016).

c. Effets des variables explicatives

Les variables « urbanisation » et « pollution lumineuse » étant trop fortement corrélées, pour chaque indice, deux modèles (GLM) ont été construits : un premier à partir de la pollution lumineuse et un second à partir de l'urbanisation. Le modèle conservé est le plus parcimonieux, c'est-à-dire celui qui a un AIC le plus faible. Pour l'ensemble des indices, les modèles prenant en compte la pollution lumineuse sont les plus parcimonieux.

Parmi les variables ressortant comme significatives, la pollution lumineuse a un effet négatif sur la richesse, la rareté, l'activité et l'occurrence de la Sérotine commune et l'occurrence de la Noctule commune. Elle a au contraire un effet positif sur l'occurrence de la Pipistrelle commune. Une autre variable significative est la variable « végétalisation » : elle a un effet positif sur la richesse et l'occurrence de la Pipistrelle de Kuhl.

Les effets de l'ensemble des variables explicatives sur les indices sont présentés dans les tableaux 2 et 3.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des variables explicatives ayant un effet significatif sur les indices globaux (PL : modèle pollution lumineuse / U : modèle urbanisation / + : effet positif / - : effet négatif)

Indices globaux	
<i>Richesse</i>	<p>PL : Végétalisation (+), pollution lumineuse (-), rémanence herbicides (-) et couverture aquatique (+)</p> <p>U : Hauteur de végétation (-), gestion minérale (-), urbanisation (-) et rémanence herbicides (-)</p>
<i>Rareté</i>	<p>PL : Pollution lumineuse(-), gestion minérale(-), surface (-), ancienneté (-)</p> <p>U : Urbanisation (-), hauteur de végétation (-), végétalisation (+), ancienneté (-) et gestion minérale (-)</p>
<i>Rareté pondérée</i>	<p>PL : Ancienneté (-)</p> <p>U : Hauteur de végétation (+) et végétalisation (+)</p>
<i>Activité</i>	<p>PL : Ancienneté (-) et pollution lumineuse (-)</p> <p>U : Végétalisation (+)</p>

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des variables explicatives ayant un effet significatif sur les indices par espèces (PL : modèle pollution lumineuse / U : modèle urbanisation / + : effet positif / - : effet négatif)

Indices par espèces			
<i>Activité</i>	<i>Pipistrelle commune</i>	PL :	Ancienneté (-)
		U :	Urbanisation (+)
	<i>Pipistrelle de Kuhl</i>	PL :	Végétalisation (+)
		U :	Urbanisation (+), surface (+), gestion minérale (+)
<i>Occurrence</i>	<i>Noctule commune</i>	PL :	Aucune
		U :	Aucune
	<i>Sérotine commune</i>	PL :	Pollution lumineuse (-)
		U :	Ancienneté (+)
<i>Occurrence</i>	<i>Pipistrelle commune</i>	PL :	Pollution lumineuse (+)
		U :	Urbanisation (+)
	<i>Pipistrelle de Kuhl</i>	PL :	Couverture aquatique (-), nombre d'arbres (+)
		U :	Surface (+), urbanisation (+)
<i>Occurrence</i>	<i>Noctule commune</i>	PL :	Pollution lumineuse (-), surface (-)
		U :	Aucune
	<i>Sérotine commune</i>	PL :	Pollution lumineuse (-), gestion minérale(+), rémanence herbicides(-), couverture aquatique (-)
		U :	Ancienneté (+)

Pour l'activité de la Pipistrelle de Kuhl, le modèle pollution lumineuse, bien que plus parcimonieux, a un R² trop faible : il est donc préférable de regarder le modèle urbanisation. Ici les variables « urbanisation », « surface » et « gestion minérale » ont un effet positif.

Les modèles pour l'activité globale et les activités de la Pipistrelle commune et la Noctule commune ont des R² trop faible pour que les résultats soient validés (R² < 10 %).

Les tableaux récapitulatifs des GLM sont en annexes 15 et 16.

IV. Discussion et Conclusion

Les résultats présentés dans ce mémoire sont ceux issus des analyses des trois premières années d'inventaires. Les véritables conclusions de l'étude se révéleront l'année prochaine quand l'ensemble des données sera traité. Les tendances observées, que ce soit pour la comparaison des milieux ou bien les effets des facteurs environnementaux, seront confirmées ou non avec l'ajout des données 2023.

1. La biodiversité des cimetières

Dans l'ensemble des cimetières de l'étude entre 2020 et 2022, 513 espèces ont été relevées pour la flore, 74 pour les oiseaux, 16 pour les chiroptères et 6 morpho-groupes pour les petits mammifères. Cela démontre que les cimetières franciliens offrent un potentiel d'accueil pour la biodiversité non négligeable à l'échelle de la ville que ce soit en milieu artificialisé, agricole ou semi-naturel et naturel.

a. Flore

La flore présente dans les cimetières est significativement différente de celle retrouvée dans les autres milieux. Elle reste globalement plus riche, plus rare et plus originale. D'après la littérature, les cimetières constituent un espace refuge pour les espèces florales rares et peu communes (Sigiel-Dopierala & Jagodzinski, 2011 ; Remacle, 2020). De plus, les gestionnaires sont incités à fleurir les espaces prairiaux et les inter-tombes, que ce soit par plantation d'espèces horticoles ou bien par semis d'espèces sauvages locales. Ce témoignage est apparu plusieurs fois dans le premier questionnaire pour l'élaboration de la variable gestion. Cet apport joue certainement en faveur du développement d'une flore plus riche et plus originale dans les cimetières. Concernant la rareté, les cortèges floristiques des cimetières sont plutôt mésoxérophile à mésohydrique. Ces traits floraux sont plus proches d'un climat sec méditerranéen plutôt que du climat océanique altéré typique qu'on retrouve en Ile-de-France. On retrouve naturellement ces espèces, telles que l'Orpin doux (*Sedum sexangulare*), sur une poignée de milieux thermophiles comme les coteaux de la Seine et dans le massif de Fontainebleau, ce qui explique leur patrimonialité pour la région.

Bien que la comparaison de la flore de prairie et d'inter-tombe ne soit pas possible en raison de l'utilisation de protocoles différents, il serait intéressant d'analyser les différences de cortège floristique entre ces deux milieux (analyse de dissimilarité de Bray-Curtis par exemple) et de

réaliser une ACP des traits floraux en fonction des différentes caractéristiques internes et externes aux cimetières.

b. Oiseaux

La comparaison des indices pour les oiseaux entre les cimetières et les autres milieux a révélé que l'avifaune avait une rareté moins élevée dans les cimetières. Cela pourrait s'expliquer par le caractère anthropisé des cimetières, plus enclin à accueillir des espèces ubiquistes et donc moins rares du fait de leur facilité à occuper des niches écologiques variées. D'autre part, l'originalité est plus élevée dans les cimetières en milieu artificialisé et plus faible dans ceux de milieu agricole. Une des explications possibles à ces tendances serait que les oiseaux en milieu agricole n'ont pas besoin de chercher un refuge dans les cimetières car les autres espaces leur sont plus favorables pour réaliser leur cycle de vie. Au contraire, le milieu urbain offre moins de possibilités ce qui fait des cimetières un habitat de substitution pour les oiseaux, à l'image des parcs urbains (Tryjanowski *et al.*, 2017).

Les cimetières, bien que zones refuges pour l'avifaune d'après la littérature (Čanádý & Mošanský, 2017 ; Löki *et al.*, 2019), semblent ici ne pas représenter un véritable havre pour les oiseaux. Cependant les résultats pour ce taxon sont moins robustes que pour les trois autres de l'étude car seules deux années de relevés ont été analysées. Il serait d'ailleurs intéressant d'étudier la relation entre les chats et les oiseaux dans les cimetières, de la même manière que pour les petits mammifères dans le cadre du protocole Mission Hérisson.

c. Petits mammifères terrestres

Les hérissons sont moins abondants dans les cimetières et semblent préférer les autres milieux. En effet, les hérissons ont tendance à préférer la ville, notamment les jardins, qui procurent des ressources alimentaires en abondance (nourriture des animaux domestiques en plus des vers de terre et arthropodes), des hivers moins rigoureux (effet de l'îlot de chaleur urbain) et une mortalité par la circulation routière moindre (Hubert *et al.*, 2011). En parallèle, l'absence de prédateurs en ville tels que le renard ou le blaireau a un effet positif sur la présence du hérisson (Hof & Bright, 2009). De plus, les cimetières sont souvent des espaces clos avec généralement comme enceinte un mur en pierre sans passage prévu pour la faune terrestre, ce qui reste un obstacle insurmontable pour cette espèce (Hof & Bright, 2009). Au contraire des hérissons, les autres petits mammifères terrestres sont plus abondants dans les cimetières. Concernant l'abondance totale, elle ne diffère pas entre les cimetières et les autres milieux : des

résultats semblables ont été trouvés dans la littérature (Gallo *et al.*, 2017). La présence de chats dans les cimetières n'affecte pas l'abondance de hérisson mais elle a tout de même un impact sur l'abondance des autres petits mammifères. En effet, les chats ont plus tendance à s'attaquer aux souris et autres mulots en milieu urbain (Baker *et al.*, 2003).

Néanmoins, dans certains cimetières, de nombreuses gamelles contenant des croquettes sont déposés afin de nourrir les chats. Cela peut éventuellement générer un biais dans les données en créant une densité artificielle de hérisson ou bien une habitude de ces derniers à venir s'alimenter à certains endroits sans passer par les tunnels. Afin d'évaluer cet effet, il aurait fallu avoir une estimation des points d'alimentation dans chaque cimetière.

d. Chiroptères

Les chiroptères ont une rareté et une rareté pondérée plus élevées dans les cimetières que dans les autres milieux. En milieu artificialisé, ce sont les indices de richesse et d'activité qui sont les plus importants par rapport aux autres milieux. D'après la littérature, les cimetières peuvent offrir des gîtes et des lieux de chasse qui n'existent pas dans les milieux fortement perturbés et fragmentés comme en ville. Les cimetières sont donc favorables à l'établissement des chiroptères (Kowarik *et al.*, 2016). Certains cimetières, tels que Nonville avec 14 espèces recensées, accueillent une grande part de la diversité en chiroptères d'Ile-de-France (20 espèces clairement établies dans la région). Les cimetières semblent donc être des lieux importants pour la conservation de ce taxon en Ile-de-France, sachant que plusieurs espèces sont « en danger critique » et « en danger ». Il serait d'ailleurs intéressant d'étudier le comportement des espèces afin de savoir si les cimetières de l'étude sont plutôt des sites de gîte ou de chasse.

Parmi l'ensemble des espèces étudiées dans les cimetières, seule la Pipistrelle de Kuhl présente des différences entre les cimetières et les autres milieux : ses indices d'activité et d'occurrence y sont plus élevés. Effectivement, cette espèce est plus sensible à la pollution lumineuse (Azam *et al.*, 2016) et trouve refuge dans les cimetières, lieux préservés de ce phénomène.

2. Influence des composantes internes et environnantes des cimetières

a. Urbanisation et biodiversité

L'urbanisation se traduit par la minéralisation des sols et la richesse floristique s'en trouve impactée négativement car un sol minéralisé offre moins d'espaces et de ressources, compliquant ainsi une installation pérenne des plantes. L'urbanisation impacte en particulier

les traits floraux : les espèces sont plus héliophiles et thermophiles quand le gradient d'urbanisation augmente. En effet, les villes se caractérisent par un îlot de chaleur urbain et un nombre d'arbres réduit permettant à la chaleur de s'accumuler, offrant ainsi des conditions idéales d'installation aux espèces typiques des milieux secs.

L'analyse des données n'a pas révélé d'impact de l'urbanisation sur les petits mammifères et les oiseaux mais il est connu dans la littérature que cette variable joue un rôle sur l'abondance et la densité des oiseaux (Clergeau *et al.*, 1998). Cette tendance se dégagera peut-être avec l'ajout de la dernière année de relevés dans les analyses mais ceci reste incertain car en milieu rural, les oiseaux n'ont pas besoin des cimetières.

Comme trouvé dans la littérature (Azam *et al.*, 2016), l'urbanisation a un impact négatif sur les chiroptères : plus la proportion de surface imperméabilisée est importante, plus l'activité des chauves-souris diminue. Une hypothèse serait que l'imperméabilisation des sols entraîne une diminution des proies (insectes dans ce cas-ci) et donc des sites de chasse moins intéressants. Une seconde hypothèse est que l'urbanisation induit de la fragmentation des habitats, rédhibitoire pour les chauves-souris car elles suivent des couloirs de déplacements constitués d'éléments du paysage tels que les arbres et les haies : certaines espèces ne sont pas capables de traverser les zones qui en sont dénuées.

b. Pollution lumineuse et biodiversité

A l'instar de l'urbanisation, la pollution lumineuse joue un rôle clé, voire plus important (Azam *et al.*, 2016) dans la présence ou l'absence des chauves-souris. Cette dernière augmente d'environ 6 % par an à l'échelle mondiale (Hölker *et al.*, 2010) et possède un effet perturbateur sur l'orientation (pouvoir attractif ou répulsif), sur la reproduction et la communication, ainsi que sur les interactions intra et inter spécifiques (Longcore & Rich, 2004). Chez les chiroptères, l'impact diffère selon la vitesse de vol et la stratégie de chasse des espèces (Jones & Rydell, 1994) : les espèces à vol rapide profitent de la lumière des lampadaires pour chasser alors que, dans les mêmes circonstances, celles à vol lent se trouvent en position de vulnérabilité face à d'éventuels prédateurs. D'autre part, la pollution lumineuse reste fortement associée à la diminution des chiroptères, en particulier pour la Pipistrelle de Kuhl et la Sérotine commune (Azam *et al.*, 2016). En effet, les résultats montrent une influence négative de cette variable sur la richesse, la rareté et l'occurrence de la Sérotine commune. Cette tendance peut trouver une explication dans le fait que cette espèce préfère des sites partiellement éclairés la nuit et non complètement, comme en ville ou pas du tout, comme dans les cimetières (Azam *et al.*, 2015).

L'espèce pour laquelle la pollution lumineuse semble favorable est la Pipistrelle commune : elle apprécie tout particulièrement la lumière et les sites éclairés toute la nuit (Azam *et al.*, 2015).

c. Végétation et biodiversité

La végétation présente dans les cimetières exerce une influence sur l'ensemble des taxons étudiés que ce soit à travers la végétalisation, la hauteur de végétation ou le nombre d'arbres.

La présence d'arbres dans les cimetières favorise le développement de plantes nitrophiles généralement assez communes qui vont participer à l'enrichissement floristique. En effet les arbres, peu nombreux dans la majorité des cimetières, jouent un rôle déterminant dans la composition floristique (Sigiel-Dopierala & Jagodzinski, 2011) avec une domination par des espèces de milieux ouverts à semi-ouverts (Remacle, 2020). Cette prépondérance floristique ressort avec la végétalisation qui exerce quant à elle une influence négative sur les traits héliophile et thermophile : plus le cimetière est végétalisé, moins les espèces retrouvées apprécient la lumière et la chaleur.

La végétation offre aux oiseaux des possibilités pour nicher mais aussi pour se nourrir. Les analyses ont effectivement révélé un impact positif de la végétalisation sur la richesse et la rareté de l'avifaune. Ces résultats vont dans le sens de la littérature (Villaseñor & Escobar, 2019). Au contraire, la hauteur de végétation affecte la richesse, la rareté et l'originalité de façon négative. N'ayant rien trouvé dans la littérature pouvant expliquer ce phénomène, une possibilité serait une détectabilité plus faible des oiseaux par les observateurs quand la strate arborée gagne en hauteur : les oiseaux sont moins visibles et les chants plus difficiles à détecter. Une autre hypothèse serait que la quantité de zones enherbées, favorables aux insectes, étant inversement proportionnée à la quantité d'arbres, les ressources alimentaires sont moins nombreuses donc les oiseaux le sont également. D'après la littérature, nos trois variables (végétalisation, hauteur de végétation et nombre d'arbres) sont les plus descriptives parmi l'ensemble des variables possibles pour décrire la végétation et impactent les oiseaux en fonction de leur type d'habitat et leurs ressources alimentaires (James, 1971). De fait, il serait pertinent de voir si la variable « nombre d'arbres » ressort l'année prochaine.

Au contraire des oiseaux, les petits mammifères terrestres sont positivement impactés par la hauteur de végétation et négativement par la végétalisation. D'après la littérature, les

caractéristiques végétales influencent la richesse en petits mammifères terrestres et, en fonction de l'espèce considérée, la tendance peut varier (Holland & Bennett, 2007). Par exemple la souris domestique préfère les zones de végétation soumises à des perturbations régulières au contraire d'autres espèces. On peut donc imaginer que la tendance observée dans les cimetières est principalement due à l'attraction des espèces pour des milieux plus ou moins soumis à du dérangement. Concernant l'effet positif de la hauteur végétation, une autre interprétation en complément serait qu'un couvert végétal plus haut limiterait la prédation par les oiseaux (notamment les petits rapaces tel que le faucon crécerelle) permettant ainsi aux petits mammifères de subir une pression de prédation moindre.

Chez les chauves-souris, la hauteur de végétation affecte les déplacements, et notamment l'activité : certaines espèces préfèrent se trouver en lisières, d'autres au niveau de la canopée (Suarez-Rubio *et al.*, 2018). D'après Suarez-Rubio *et al.*, 2018, la présence d'une végétation dense à une hauteur de 5 à 7 mètres influe négativement la présence de chauves-souris au contraire des arbustes de tailles inférieures. Les résultats présentés précédemment sont cohérents avec la littérature : il existe certainement un lien avec la quantité d'insectes disponibles pour se nourrir. D'autre part, la rareté et la rareté pondérée ne réagissent pas de la même manière à la hauteur de végétation. Une explication est que la rareté pondérée donne plus de poids aux espèces rares inféodées aux milieux forestiers comme la Barbastelle d'Europe alors que la rareté lisse l'ensemble en prenant plus en compte les espèces communes des milieux urbains qui sont prépondérantes dans les relevés telles que la Pipistrelle commune. La végétalisation impacte positivement la richesse, la rareté et la rareté pondérée. Cette variable peut jouer un rôle indirect dans la recherche de nourriture par les chauves-souris : plus elle abrite des insectes (notamment phytophages ou pollinisateurs), plus l'attractivité pour les chiroptères augmente (Ober & Hayes, 2008).

d. Les autres variables et biodiversité

La couverture aquatique est apparue comme significative uniquement pour les chiroptères : plus la couverture aquatique est importante, plus la richesse augmente. Ce phénomène peut être lié aux espèces caractéristiques des zones humides, comme le Murin de Daubenton dont le terrain de chasse se compose principalement de surfaces d'eau calme (étangs, lacs...), qui s'ajoutent aux espèces courantes dans les cimetières. De plus, les zones humides sont des milieux où la biomasse en invertébrés est très importante ce qui en fait des zones de chasse privilégiées pour les chiroptères.

D'après la littérature, la richesse floristique augmente avec la superficie du cimetière (Nowińska *et al.*, 2020 ; Remacle, 2020). Ce résultat n'est pas apparu dans les analyses. La raison est que le plan d'échantillonnage floristique de l'étude ne prend pas en compte la surface : le protocole est standardisé mais pas représentatif de la superficie des cimetières. Cette uniformisation protocolaire expliquerait que la surface ne ressorte pas significativement dans les modèles statistiques.

L'ancienneté s'est révélée être un facteur favorisant la rareté floristique notamment en intertombe. Cette tendance peut être due à l'état des sépultures des cimetières plus anciens qui présentent des anfractuosités et autres fissures plus nombreuses qui offrent aux plantes des possibilités de s'établir. Ces plantes, qui ont tendance à préférer les milieux secs et pauvres, ont ainsi une abondance à la hausse (Nowińska *et al.*, 2020).

La rémanence en herbicides a un effet positif sur l'originalité floristique, autrement dit plus l'arrêt des herbicides dans les cimetières est récent, plus la flore présente est originale. L'hypothèse qui pourrait être formulée serait que lorsque l'arrêt est récent, il subsiste pendant un certain temps des résidus d'herbicides dans le sol : seules des espèces capables de survivre se développent augmentant ainsi l'originalité floristique. Il serait par ailleurs intéressant de regarder les cortèges floristiques des cimetières ayant récemment arrêté l'usage des herbicides pour vérifier si une résistance aux produits phytosanitaires leur est connue.

L'intensivité de gestion est une composante importante à prendre en compte pour la biodiversité en ville (Beninde *et al.*, 2015). Concernant la flore, plus la gestion est intensive, plus la rareté floristique en zones prairiales est importante. Un désherbage intense peut favoriser les plantes adaptées aux milieux perturbés, communes en ville et moins courantes dans les autres milieux. Il en est de même pour les chiroptères : plus la gestion est forte, plus la richesse et la rareté sont élevées. Face à ces résultats qui peuvent paraître contre-intuitifs, une hypothèse serait que désherber plus intensément provoquerait un délogement régulier des insectes facilitant la chasse des chiroptères et attirant ainsi ces derniers dans les cimetières fortement gérés.

3. Perspectives d'amélioration des analyses

a. Les sciences participatives

Le choix des sciences participatives a été fait afin d'avoir à disposition un nombre suffisant de données pour comparer les cimetières aux autres milieux. Bien que n'étant pas le meilleur système pour réaliser un suivi de la biodiversité, cela permet d'aborder des questions

pour lesquelles il n'aurait pas été possible de répondre sans les données issues des sciences participatives (Chandler *et al.*, 2017 ; Peter *et al.*, 2019).

L'utilisation des données issues de tels protocoles soulève donc plusieurs problématiques quant aux biais possibles. En effet, en fonction de l'observateur, les compétences varient et pour un même observateur, l'expérience individuelle évolue, notamment pour le SPIPOLL (Serret *et al.*, 2019). Cependant il est important de souligner qu'un fort biais observateur a été mis en évidence lors de l'analyse de la flore. Le fait que les protocoles floristiques aient été réalisés par des professionnels (CBNBP) pourrait laisser croire que ce biais n'a pas lieu d'être, preuve que de telles variations existent même à un haut niveau d'expertise. Il aurait été pertinent de vérifier ce potentiel biais pour les autres taxons (surtout EPOC) mais une partie des données collectées par différentes personnes ont été rentrées au même nom.

Le protocole SPIPOLL, bien que non analysé cette année, pose par ailleurs des questionnements concernant son utilisation dans le cadre de l'étude. En effet, le SPIPOLL est pertinent pour une analyse globale des pollinisateurs à large échelle (Desaegher *et al.*, 2018 ; Levé *et al.*, 2019) mais cela reste difficile à appliquer sur un panel de 45 cimetières. De plus, l'utilisation des morpho-groupes tels que « mouche difficiles à déterminer », regroupe en réalité plusieurs espèces de différentes familles et est très récurrent dans les relevés de l'étude. Ces imprécisions risquent de complexifier l'obtention de conclusions fines sur les pollinisateurs.

L'ensemble de ces éléments laisse penser que cela entraîne des variations de rigueur et d'exactitude de la base de données (Gosselin *et al.*, 2010 ; Houllier & Merilhou-Goudard, 2017). Cependant on peut considérer que ces biais se trouvent lissés du fait du nombre conséquent de données utilisées pour les analyses statistiques (2 847 pour VF ; 7 206 pour EPOC ; 1 704 pour MH et 10 588 pour VC).

Compte tenu du jeu de données important, les résultats obtenus dans l'étude semblent donc suffisamment robustes pour en tirer des conclusions. Cependant il pourrait être intéressant de mettre en complément de nos données, les données dites opportunistes. D'après Coron *et al.*, 2018, l'estimation des abondances d'espèces sont plus fines avec l'ajout de ces dernières pour les analyses. Il serait possible d'envisager une extrapolation de cette méthode d'estimation des abondances aux calculs de nos indices (richesse, rareté, etc...) mais il reste incertain qu'il y ait suffisamment de données opportunistes couvrant l'ensemble des cimetières de l'étude.

b. Variables explicatives

Au commencement de l'étude, une variable « connectivité à la trame verte » avait été créée à partir de l'Ecoline, cartographie développée par l'Institut Paris Région. Cependant, cette dernière couvre uniquement les départements de la grande couronne, prenant ainsi en compte seulement 30 cimetières sur les 45 de l'étude. Ce manque posait un problème de représentativité pour les analyses statistiques, c'est pourquoi cette variable n'a pas été incluse dans les GLM. Il faudrait trouver une cartographie semblable à l'Ecoline mais couvrant cette fois-ci l'ensemble de l'Ile-de-France. Développer cette variable reste intéressant dans la mesure où il a été montré que la connectivité pouvait jouer un rôle pour la biodiversité en ville. A titre d'exemple, l'absence de connectivité est défavorable aux déplacements des hérissons (Hof & Bright, 2009).

Une deuxième variable à améliorer serait la rémanence en herbicides. En effet, cette variable a été créée à partir d'un questionnaire dans lequel seule la date d'arrêt d'utilisation des herbicides était prise en compte. Cette rémanence ne dépendant pas uniquement de cela mais aussi de la quantité utilisée et de la fréquence d'application, il serait plus précis de réaliser des analyses toxicologiques du sol afin d'évaluer les concentrations d'herbicides.

Il peut être pertinent de mettre à jour la variable « pollution lumineuse » pour les dernières années de relevés. Bien qu'en augmentation à l'échelle globale (Hölker *et al.*, 2010), la pollution lumineuse tend à diminuer pour un bon nombre de localités : certaines communes adoptent des politiques publiques d'extinction des lampadaires une partie de la nuit, comme la ville de Meudon (92) depuis octobre 2022.

Parmi les résultats contre-intuitifs obtenus, on retrouve l'ancienneté qui a un effet négatif sur l'indice de rareté des chiroptères. En effet, on pourrait penser qu'un cimetière ancien présente plus de gîtes pour les chauves-souris (anfractuosités, vieilles chapelles en état d'abandon, etc...) mais ancien ne veut pas forcément dire abandonné : les tombes sont entretenues, de nouvelles tombes en remplacent d'autres et parfois des zones d'extension sont implémentées. De ce fait, prendre en compte uniquement la date de création des cimetières n'est peut-être pas suffisant et une amélioration tenant compte des éléments précédemment cités peut être adéquate. Il pourrait être intéressant d'inclure l'âge des arbres dans cette variable car il existe une corrélation positive entre cette dernière et la richesse en oiseaux (Tryjanowski *et al.*, 2017).

D'autre part, le Corine Land Cover présente quelques faiblesses dans l'attribution de la classe. En effet les mailles sont relativement larges (par exemple les petits boisements ne sont pas détectés) et l'attribution de la classe se fait en fonction du type de surface majoritaire. Par

exemple, si 57 % de la surface est occupée par des territoires artificialisés, 40% de forêts et milieux semi-naturels et 3% de zones humides, la classe attribuée sera « territoires artificialisés ». C'est précisément le cas pour certains cimetières, tels que celui de Fontainebleau, qui se retrouvent entre deux : de ce fait une part importante de l'information géographique est perdue. Une autre limite de l'étude liée à cette classification est le faible nombre de répliques pour les cimetières en milieux « naturels et semi-naturels » ce qui pose problèmes pour les comparaisons de milieux.

L'un des principaux problèmes rencontrés lors des analyses statistiques est celui des pouvoirs explicatifs de modèles (R^2) faibles. Cela est apparu pour la flore et les chiroptères, ne permettant pas de valider les résultats obtenus. Pour contourner ces obstacles, il pourrait être judicieux de développer de nouvelles variables telles que « essence d'arbres » ou bien « type de sol ». Pour la première, il a été montré que les oiseaux ont des préférences d'essence pour nicher (Kocian *et al.*, 2003) mais aussi pour se nourrir, notamment en fonction des communautés d'insectes qu'ils abritent (Holmes & Robinson, 1981 ; Gabbe *et al.*, 2002). Les chauves-souris étant également insectivores, les essences d'arbres exercent possiblement la même influence. Concernant « type de sol », certaines plantes affectionnant plus ou moins certains types de substrats, cette variable peut être appropriée pour expliquer la flore présente dans les cimetières. Cette variable pourrait être élaborée à partir de la carte des sols disponible sur Géoportail par exemple (<https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols>) ou plus finement en réalisant des analyses physico-chimiques du sol.

De nombreuses hypothèses discutées précédemment reposent sur le fait que les ressources alimentaires, influencées par la végétation majoritairement, jouent un rôle sur les indices de biodiversité de certains taxons. Il serait donc intéressant d'évaluer la biomasse disponible en invertébrés dans les cimetières afin de le prendre en compte dans les modèles.

Références bibliographiques

Azam, C., Kerbiriou, C., Vernet, A., Julien, J., Bas, Y., Plichard, L., Maratrat, J. & Le Viol, I. (2015). Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats? *Global Change Biology*, 21(12), 4333-4341. <https://doi.org/10.1111/gcb.13036>

Azam, C., Le Viol, I., Julien, J.F., Bas, Y., & Kerbiriou, C. (2016). Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. *Landscape Ecol*, 31(10), 2471–2483. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0)

Baker, P., Ansell, R., Dodds, P., Webber, C., & Harris, S. (2003). Factors affecting the distribution of small mammals in an urban area. *Mammal Review*, 33(1), 95-100. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2907.2003.00003.x>

Beninde, J., Veith, M., & Hochkirch, A. (2015). Biodiversity in cities needs space: A meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. *Ecology Letters*, 18(6), 581-592. DOI:10.1111/ele.12427

Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological economics*, 29(2), 293-301. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0)

Čanády, A. & Mošanský, L. (2017). Public Cemetery as a biodiversity hotspot for birds and mammals in the urban environment of Kosice city (Slovakia). *Zoology and Ecology*, 27(3), 185-195. DOI:10.1080/21658005.2017.1366024

Ceballos, G., García, A., & Ehrlich, P. R. (2010). The sixth extinction crisis: Loss of animal populations and species. *Journal of Cosmology*, 8, 1821–1831.

Chandler, M., See, L., Copas, K., Bonde, A., López, B. C., Danielsen, F., Legind, J. K., Masinde, S., Miller-Rushing, A. J., Newman, G., Rosemartin, A. & Turak, E. (2017). Contribution of citizen science towards international biodiversity monitoring. *Biological Conservation*, 213(B), 280-294. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.09.004>

Clergeau, P., Savard, J. P., Mennechez, G. & Falardeau, G. (1998). Bird Abundance and Diversity along an Urban-Rural Gradient: A Comparative Study between Two Cities on Different Continents, *The Condor*, 100(3), 413–425, <https://doi.org/10.2307/1369707>

Collard, M., Host, S., Colombier, C. & Barra, M. (2023). *Santé et biodiversité. Analyse des enjeux pour une approche intégrée en Île-de-France*. Observatoire Régional de Santé et Agence régionale de la biodiversité Île-de-France.

Coron, C., Calenge, C., Giraud, C. & Julliard R. (2018). Bayesian estimation of species relative abundances and habitat preferences using opportunistic data. *Environmental and Ecological Statistics*, 25, 71–93. <https://doi.org/10.1007/s10651-018-0398-2>

Deboeuf De Los Rios, G., Barra, M. & Grandin., G. (2022). *Renaturer les villes. Méthode, exemples et préconisations*. Agence régionale de la biodiversité Île-de-France, L'Institut Paris Région. <https://www.arb-idf.fr/nos-travaux/publications/renaturer-les-villes/>

Desaegher, J., Nadot, S., Fontaine, C., & Colas, B. (2018). Floral morphology as the main driver of flower-feeding insect occurrences in the Paris region. *Urban Ecosystems*, 21(4), 585-598. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0759-5>

Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P.J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P.E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A.K., Zurell, D. & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27-46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>

Elmqvist, T., Setälä, H., Handel, S.N., van der Ploeg, S., Aronson, J., Blignaut, J.N., Gómez-Baggethun, N., Nowak, D.J., Kronenberg, J. & de Groot, R. (2015). Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 101-108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2015.05.001>

Flandin, J. (2022). *Guide de conception et de gestion écologique des cimetières*, Agence régionale de la biodiversité Île-de-France. <https://www.arb-idf.fr/nos-travaux/publications/conception-et-gestion-ecologique-des-cimetieres/>

Gabbe, A.P., Robinson, S.K. & Brawn, J.D. (2002). Tree-Species Preferences of Foraging Insectivorous Birds: Implications for Floodplain Forest Restoration. *Conservation Biology*, 16(2), 462-470. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2002.00460.x>

Gallo, T., Fidino, M., Lehrer, E., & Magle, S. (2017). Mammal diversity and metacommunity dynamics in urban green spaces: Implications for urban wildlife conservation. *Ecological Applications*, 27(8), 2330-2341. <https://doi.org/10.1002/eap.1611>

Ganivet, E. (2020). Growth in human population and consumption both need to be addressed to reach an ecologically sustainable future. *Environment, Development and Sustainability*, 22(6), 4979-4998. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00446-w>

Gosselin M., Gosselin F. & Julliard R. (2010). L'essor des sciences participatives pour le suivi de la biodiversité : intérêts et limites. *Sciences Eaux & Territoires*, 3(3), 76-83. <https://doi.org/10.3917/set.003.0076>

Hof, A. R. & Bright, P. W. (2009). The value of green-spaces in built-up areas for western hedgehogs. *Lutra*, 52(2), 69-82.

Holland, G. J. & Bennett, A. F. (2007). Occurrence of small mammals in a fragmented landscape: the role of vegetation heterogeneity. *Wildlife Research*, 34(5), 387-397. <https://doi.org/10.1071/WR07061>

Holmes, R.T. & Robinson, S.K. (1981). Tree species preferences of foraging insectivorous birds in a northern hardwoods forest. *Oecologia*, 48, 31-35. <https://doi.org/10.1007/BF00346985>

- Hölker, F., Moss, T., Griefahn, B., Kloas, W., Voigt, C., Henckel, D., Hänel, A., Kappeler, P., Voelker, S., Schwöpe, A., Franke, S., Uhrlandt, D., Fischer, J., Klenke, R., Wolter, C. & Tockner, K. (2010). The Dark Side of Light: A Transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy. *Ecology and Society*, 15(4), 13. [10.5751/ES-03685-150413](https://doi.org/10.5751/ES-03685-150413)
- Houllier F., Joly P. B. & Merilhou-Goudard J. B. (2017). Les sciences participatives : une dynamique à conforter. *Natures Sciences Sociétés*, 25(4), 418-423. <https://doi.org/10.1051/nss/2018005>
- Hubert, P., Julliard, R., Biagianti, S. & Poulle, M.L. (2011). Ecological factors driving the higher hedgehog (*Erinaceus europeus*) density in an urban area compared to the adjacent rural area. *Landscape and Urban Planning*, 103(1), 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.05.010>
- IPBES (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES secretariat.
- James, F. C. (1971). Ordinations of Habitat Relationships among Breeding Birds. *The Wilson Bulletin*, 83(3), 215–236. <http://www.jstor.org/stable/4160097>
- Jones, G. & Rydell, J. (1994). Foraging Strategy and Predation Risk as Factors Influencing Emergence Time in Echolocating Bats. *Philosophical Transactions : Biological Sciences*, 346(1318), 445-455. [10.1098/rstb.1994.0161](https://doi.org/10.1098/rstb.1994.0161)
- Kocian, L., Harustiaková, D., Melicherová, D. & Matusková, A. (2003). Breeding bird communities in three cemeteries in the City of Bratislava (Slovakia). *Folia Zoologica -Praha-*, 52(2), 177-188.
- Kowarik, I., Buchholz, S., von der Lippe, M. & Seitz, B. (2016). Biodiversity functions of urban cemeteries: Evidence from one of the largest Jewish cemeteries in Europe. *Urban Forestry & Urban Greening*, 19, 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.06.023>
- Levé, M., Baudry, E., & Bessa-Gomes, C. (2019). Domestic gardens as favorable pollinator habitats in impervious landscapes. *The Science of the Total Environment*, 647, 420-430. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.310>
- Löki, V., Deák, B., Lukács, A. B. & Molnár A.V. (2019). Biodiversity potential of burial places – a review on the flora and fauna of cemeteries and churchyards. *Global Ecology and Conservation*, 18 (e00614). <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00614>
- Longcore, T. & Rich, C. (2004). Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4), 191-198. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:ELP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2)
- Marín-Gómez, O. H. & MacGregor-Fors, I. (2021). A global synthesis of the impacts of urbanization on bird dawn choruses. *Ibis*, 163(4), 1133-1154. <https://doi.org/10.1111/ibi.12949>
- Martin, T.G., Wintle, B.A., Rhodes, J.R., Kuhnert, P.M., Field, S.A., Low-Choy, S.J., Tyre, A.J. & Possingham, H.P. (2005). Zero tolerance ecology: improving ecological inference by modelling the source of zero observations. *Ecology Letters*, 8(11), 1235-1246. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00826.x>

- McKinney, M. (2002). Urbanization, Biodiversity, and Conservation: The impacts of urbanization on native species are poorly studied, but educating a highly urbanized human population about these impacts can greatly improve species conservation in all ecosystems. *BioScience*, 52(10), 883-890. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0883:UBAC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0883:UBAC]2.0.CO;2)
- Nowińska, R., Czarna, A. & Kozłowska, M. (2020). Cemetery types and the biodiversity of vascular plants – A case study from south-eastern Poland, *Urban Forestry & Urban Greening*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126599>
- Ober, H., & Hayes, J. (2008). Influence of Vegetation on Bat Use of Riparian Areas at Multiple Spatial Scales. *The Journal of Wildlife Management*, 72(2), 396-404. <https://doi.org/10.2193/2007-193>
- Peter, M., Diekötter, T. & Kremer, K. (2019). Participant Outcomes of Biodiversity Citizen Science Projects: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 11(10), 2780. <https://doi.org/10.3390/su11102780>
- Ramalho, C. & Hobbs, R. (2012). Time for a change: dynamic urban ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 27(3), 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.10.008>
- Remacle, A. (2020). Inventaire de la flore des cimetières de la Lorraine belge. *Dumortiera*, 116, 3–25. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4024101>
- Serret, H., Deguines, N., Jang, Y., Lois, G., & Julliard, R. (2019). Data Quality and Participant Engagement in Citizen Science: Comparing Two Approaches for Monitoring Pollinators in France and South Korea. *Citizen Science: Theory and Practice*, 4(1), 22. [10.5334/cstp.200](https://doi.org/10.5334/cstp.200)
- Sigiel-Dopierala, A. & Jagodzinski, A.M. (2011). Materials to the vascular flora of the neglected Evangelical cemeteries of the western part of the Drawsko Landscape Park (Poland). *Roczniki Akademii Rolniczej Botanika-Steciana*, 15, 57-64.
- Singh, J.S. (2002). The biodiversity crisis: A multifaceted review. *Current Science*, 82(6), 638-647. <http://www.jstor.org/stable/24106689>
- Suarez-Rubio, M., Ille, C. & Bruckner, A. (2018). Insectivorous bats respond to vegetation complexity in urban green spaces. *Ecology and Evolution*, 8(6), 3240– 3253. <https://doi.org/10.1002/ece3.3897>
- Tryjanowski, P., Morelli, F., Peter Mikula, Krištín, A., Indykiewicz, P., Grzywaczewski, G., Kronenberg, J. & Jerzak, L. (2017). Bird diversity in urban green space: A large-scale analysis of differences between parks and cemeteries in Central Europe. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27, 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.08.014>
- Villaseñor, N., & Escobar, M. (2019). Cemeteries and biodiversity conservation in cities: How do landscape and patch-level attributes influence bird diversity in urban park cemeteries? *Urban Ecosystems*, 22(6), 1037-1046. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00877-3>
- Wenger, S.J. & Freeman, M.C. (2008). Estimating species occurrence, abundance, and detection probability using zero-inflated distributions. *Ecology*, 89(10), 2953-2959. <https://doi.org/10.1890/07-1127.1>

Acronymes

ACP : Analyse en Composantes Principales

AIC : Akaike information criterion / Critère d'information d'Akaike

ARB îdF : Agence régionale de la biodiversité en Île-de-France

CBNBP : Conservatoire Botanique National du Bassin Parisien

CLC : Corine Land Cover

EPOC : Estimation des Populations d'Oiseaux Communs

GLM : Generalized Linear Model / Modèle linéaire généralisé

GLMM : Generalized Linear Mixed Model / Modèle linéaire généralisé mixte

IPR : Institut Paris Région

LPO : Ligue de Protection des Oiseaux

MH : Mission Hérisson

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle

Mos : Mode d'occupation du sol

NDVI : Normalized Vegetation Index

SDMR : Sauvages de ma rue

SPIPOLL : Suivi Photographique des Insectes Pollinisateurs

STOC-EPS : Suivi Temporel des Oiseaux Communs par Echantillonnage Ponctuel Simple

VC : Vigie-Chiro

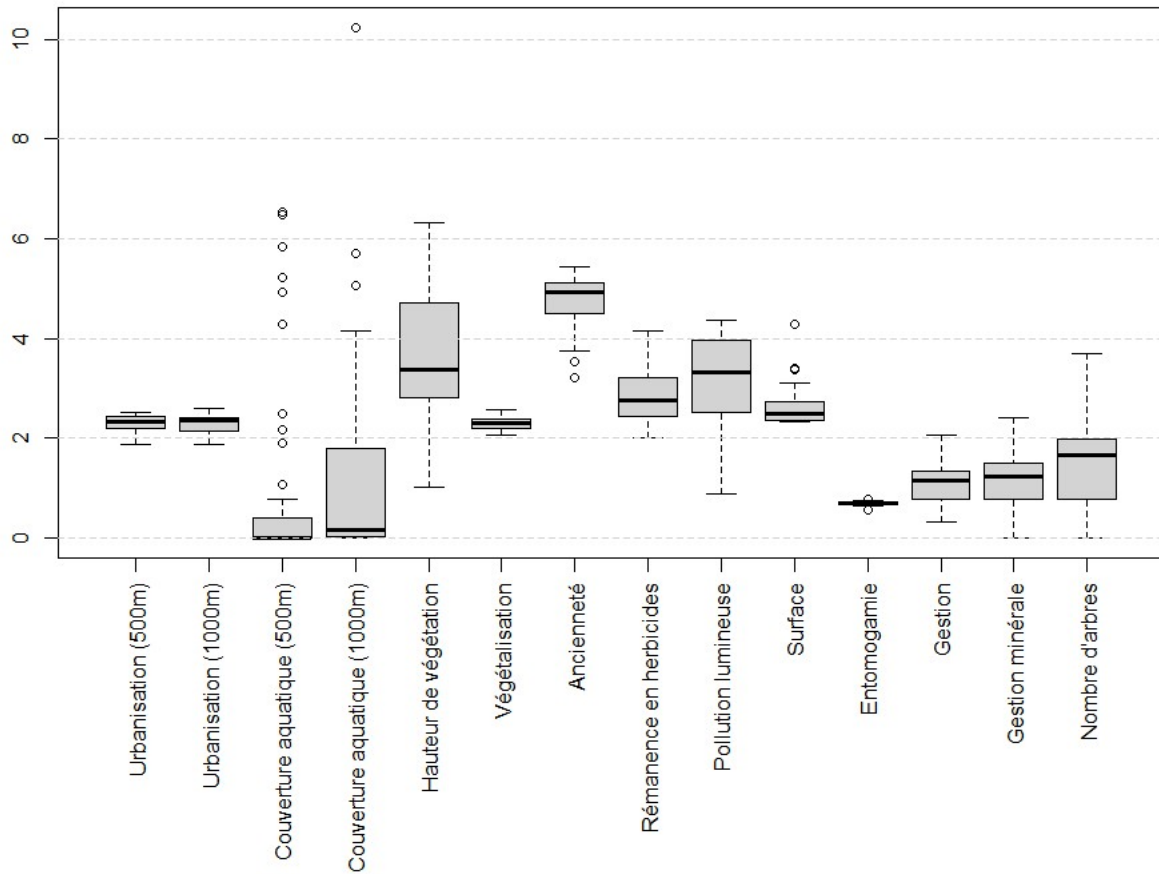
VF : Vigie-Flore

VIIRS : Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

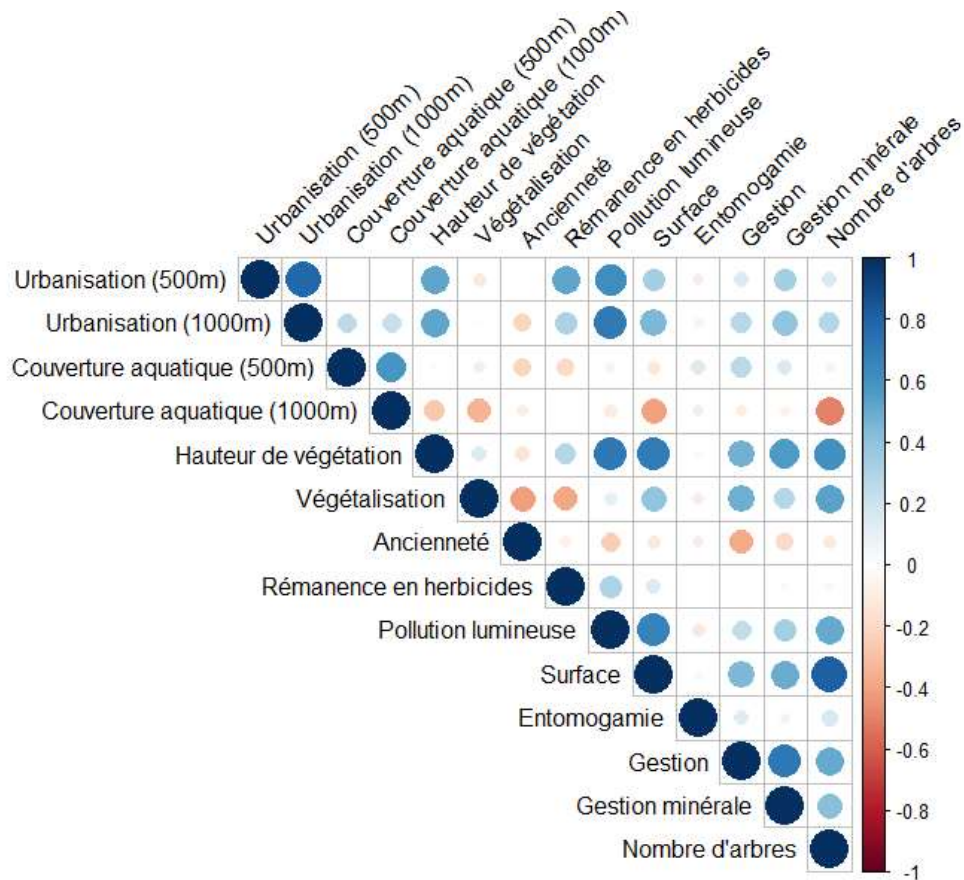
ZI : Zero inflated modèle / Modèle zéro enflé

ANNEXES

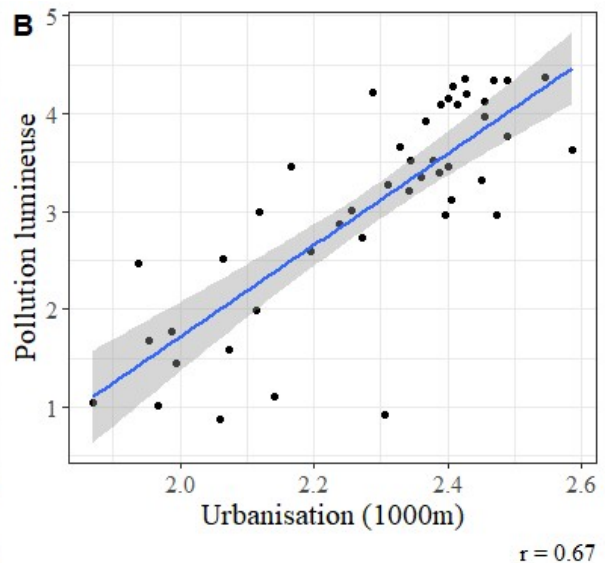
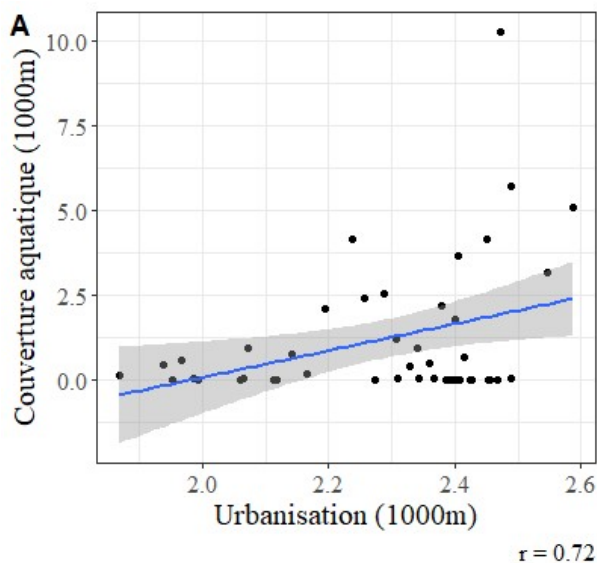
Annexe 1 : VARIABLES EXPLICATIVES – Représentation graphique des variables explicatives mises à l'échelle par transformation logarithmique



Annexe 2 : VARIABLES EXPLICATIVES – Matrice des corrélations des variables explicatives utilisées pour les modèles statistiques



Annexe 3 : VARIABLES EXPLICATIVES – Représentation graphique des variables corrélées entre elles : la couverture aquatique (1000m) (A) et la pollution lumineuse (B) en fonction de l'urbanisation (1000m), r indique le coefficient de corrélation



Annexe 4 : PROTOCOLES – Fiche terrain pour le protocole EPOC. Les classes de distances et le statut des individus vus et/ou entendus sont à relever.

STOC-EPS
Fiche Terrain – Tableau



Date: Heure de début: N° du point : N° Passage : 1 = Précoce (mars)
 * date charnière 15/05 en montagne 2 = avant le 8 mai*
 3 = après le 8 mai*

Nom Observateur :

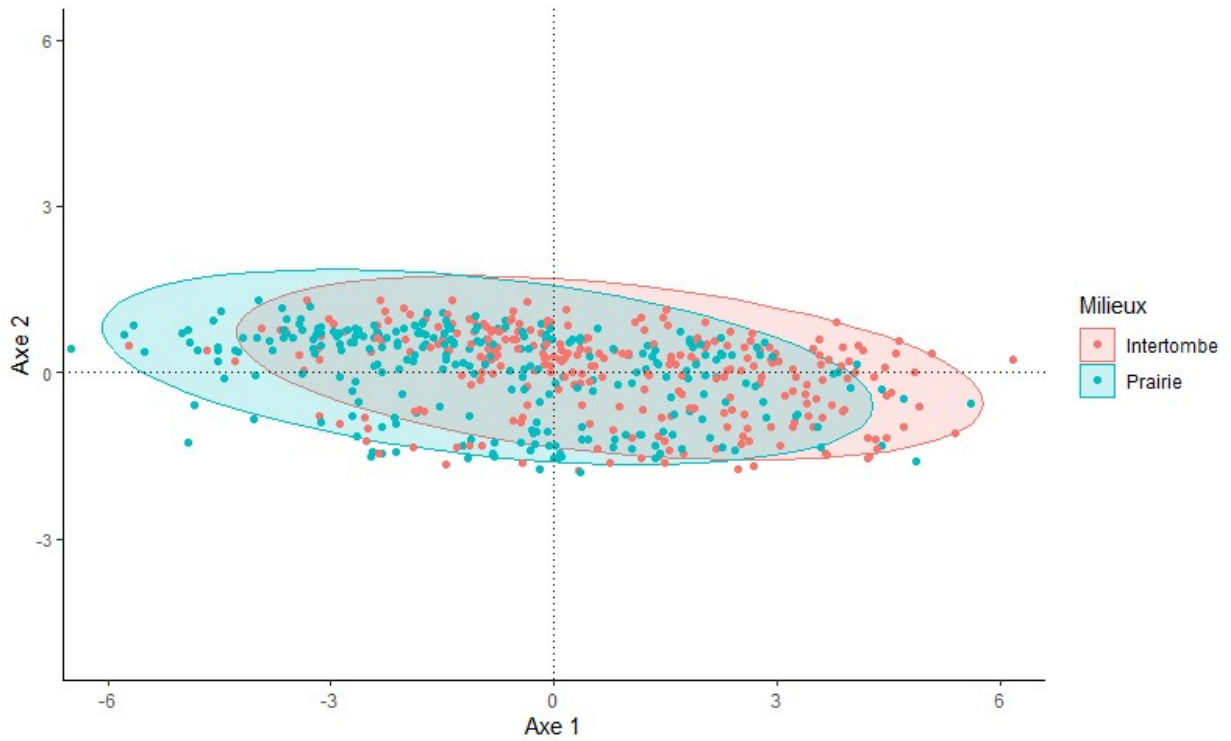
Nom référence national:
 (Ex: 851327)

Nom local :
 (Nom personnalisé facultatif)

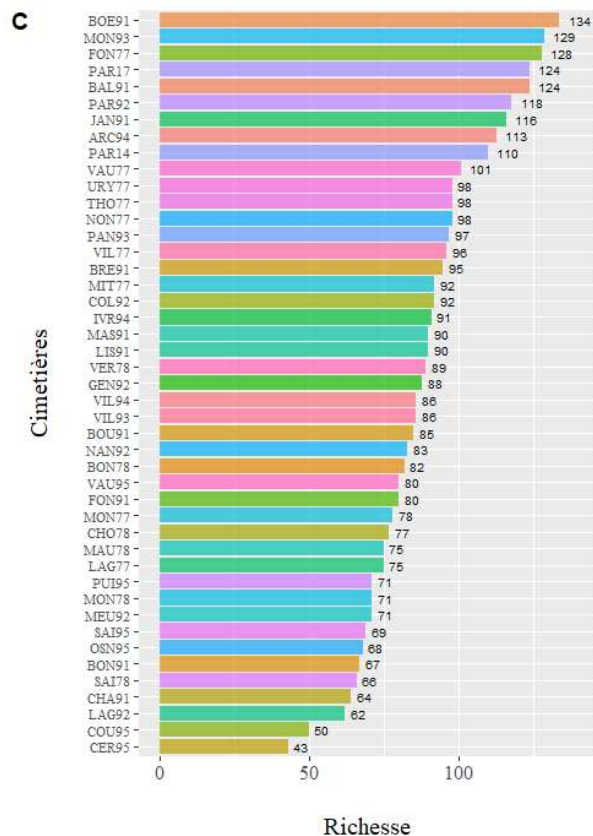
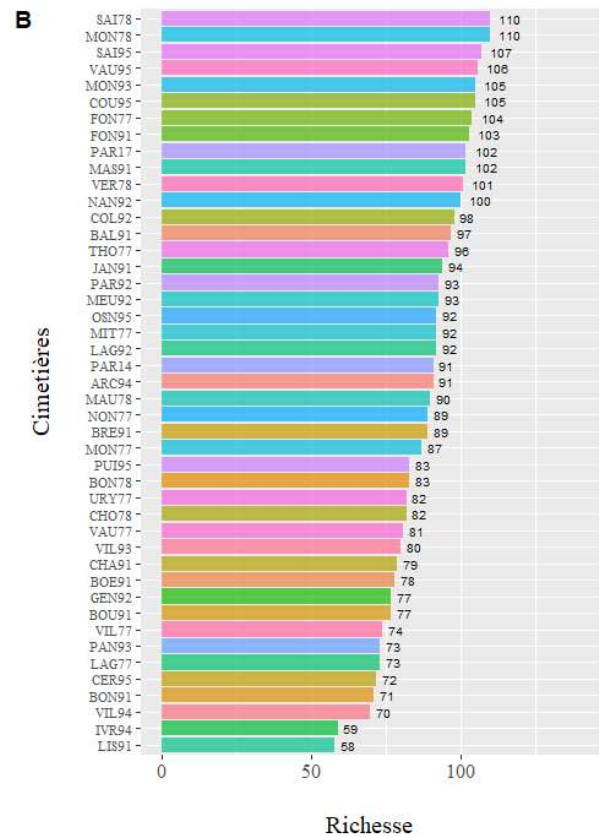
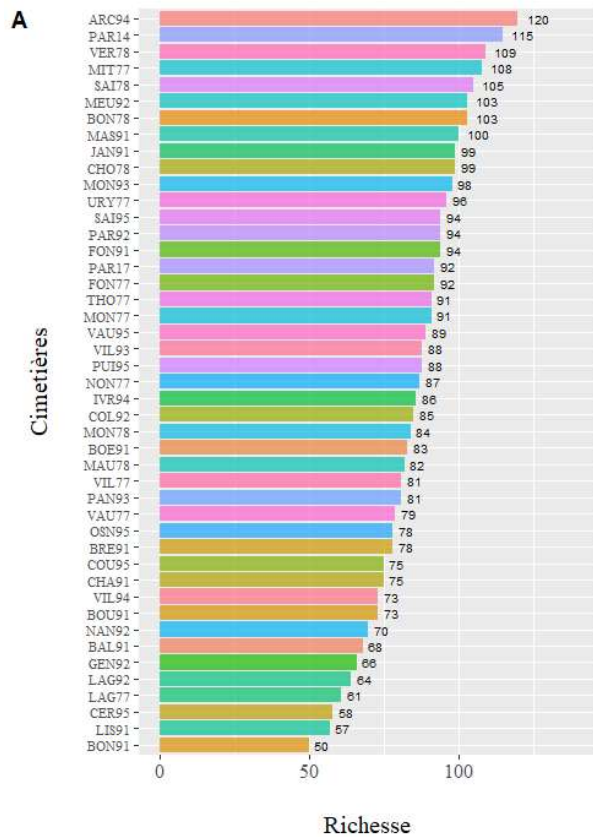
PLUIE	VENT	VISIBILITÉ	NUAGE	NEIGE
Absente = 1	Absent = 1	Bonne = 1	0-33% = 1	Absente = 1
Bruine = 2	Faible = 2	Modérée = 2	33-66% = 2	0 à 1 cm = 2
Averses = 3	Moyen à fort = 3	Faible = 3	66-100% = 3	1 à 5 cm = 3
				> 5cm = 4

ESPECES	<25m	25 – 100 m	100 – 200 m	> 200 m	En vol	Total

Annexe 5 : FLORE – Analyse multidimensionnelle non métrique (NMDS) de la flore. Elle illustre la différence de composition spécifique entre les milieux inter-tombaux et prairiaux.



Annexe 6 : FLORE - Synthèse graphique des richesses floristiques moyennes par cimetière en 2020 (A), 2021 (B) et 2022 (C)



- | | |
|---------------------------------|-------------------------------|
| ARC94 : Arcueil | MIT77 : Mity-Mory |
| BAL91 : Ballancourt-sur-Essonne | MON77 : Montgé-en-Goële |
| BOE91 : Boutigny-sur-Essonne | MON78 : Montesson |
| BON78 : Bonnelles | MON93 : Montreuil |
| BON91 : Bondoufle | NAN92 : Nanterre |
| BOU91 : Boussy-Saint-Antoine | NON77 : Nonville |
| BRE91 : Breuillet | OSN95 : Osny |
| CER95 : Cergy | PAN93 : Pantin |
| CHA91 : Champlan | PAR14 : Paris Montparnasse |
| CHO78 : Choisel | PAR17 : Paris Batignolles |
| COL92 : Colombes | PAR92 : Paris Bagneux |
| COU95 : Courdimanche | PUJ95 : Puiseux-Pontoise |
| FON77 : Fontainebleau | SAI78 : Saint-Germain-en-Laye |
| FON91 : Fontenay-lès-Briis | SAI95 : Saint-Ouen-l'Aumône |
| GEN92 : Gennevilliers | THO77 : Thorigny-sur-Marne |
| IVR94 : Ivry-sur-Seine | URY77 : Ury |
| JAN91 : Janvry | VAU77 : Vaux-le-Pénil |
| LAG77 : Lagny-sur-Marne | VAU95 : Vauréal |
| LAG92 : La Garenne-Colombes | VER78 : Versailles |
| LIS91 : Lisses | VIL77 : Villiers-sous-Grez |
| MAS91 : Massy | VIL93 : Villeteuse |
| MAU78 : Maurecourt | VIL94 : Villejuif |
| MEU92 : Meudon | |

Annexe 7 : FLORE - Tableau récapitulatif des GLMM

Indice	Variable explicative significative	P-value	Effet	Modèle
Richesse	Urbanisation (1000 m)	0.0001***	-	AIC : 862.1
	Nombre d'arbres	6e-06***	+	R ² conditionnel : 49.7 % R ² marginal : 24.6 %
Richesse inter-tombe	Urbanisation (1000 m)	0.001**	-	AIC : 956
	Nombre d'arbres	0.01*	+	R ² conditionnel : 29 % R ² marginal : 13.5 %
Richesse zones enherbées	Urbanisation (1000 m)	2e-5***	-	AIC : 362.7
	Nombre d'arbres	0.001**	-	R ² conditionnel : 36.6 % R ² marginal : 23.4 %
Rareté	Ancienneté	0.0002***	+	AIC : 680.2 R ² conditionnel : 0.4 % R ² marginal : 0.2 %
Rareté inter-tombe	Ancienneté	8e-05***	+	AIC : 692.1 R ² conditionnel : 1% R ² marginal : 0.8 %
Rareté zones enherbées	Gestion	0.0009***	-	AIC : 706.7
	Urbanisation (1000 m)	0.01*	-	R ² conditionnel : 2.3 % R ² marginal : 2.2 %
Originalité	Ancienneté	0.01*	+	AIC : 1122
	Rémanence en herbicides	0.02*	+	R ² conditionnel : 11.4 % R ² marginal : 6.2 %
Originalité inter-tombe	Végétalisation	0.001**	+	AIC : 795.9 R ² conditionnel : 3.9 % R ² marginal : 1.8 %
Originalité zones enherbées	Végétalisation	0.03*	+	AIC : 501.9 R ² conditionnel : 1 % R ² marginal : 0.9 %

Annexe 8 : FLORE – Tableau récapitulatif de l’analyse des traits floraux par GLM

Indice	Variable explicative significative	P-value	Effet	Modèle
Lumière	Végétalisation	1.4e -05 ***	–	AIC : 1366
	Nombre d’arbres	0.006 **	+	R ² : 34 %
	Urbanisation (1000 m)	0.008 **	+	
Température	Végétalisation	0.0008 ***	–	AIC : 924
	Nombre d’arbres	0.007 **	+	R ² : 47.4 %
	Urbanisation (500 m)	0.04 *	+	
Humidité atmosphérique	Végétalisation	0.02 *	+	AIC : 899
	Nombre d’arbres	0.02 *	+	R ² : 41.7 %
	Urbanisation (1000 m)	0.006 **	+	
	Ancienneté	0.03 *	–	
Humidité édaphique	Urbanisation (1000 m)	0.008 **	+	AIC : 862
	Ancienneté	0.007 **	–	R : 42.1 %
Niveau trophique	Nombre d’arbres	0.03 *	+	AIC : 1598
	Urbanisation (1000 m)	4.7e-10 ***	+	R ² : 55.5 %
	Ancienneté	5.5e-06 ***	–	

Annexe 9 : FLORE – Tableau des traits floraux retrouvés dans les cimetières associés à leurs scores (données CBNBP)

Traits floraux					
Score	Lumière	Température	Humidité atmosphérique	Humidité édaphique	Niveau trophique
4			Aéro mésoxérocline	Mésoxérophile	Méso oligotrophile
5		Planitiaire à montagnarde	Aéro mésohydrique	Mésohydrique	Méso trophile
6	Hémi héliophile	Planitiaire thermophile	Aéro mésohygrocline	Mésohygrocline	Méso eutrophile
7	Héliophile				Eutrophile
8	Perhéliophile				

Annexe 10 : OISEAUX - Tableau récapitulatif des GLM

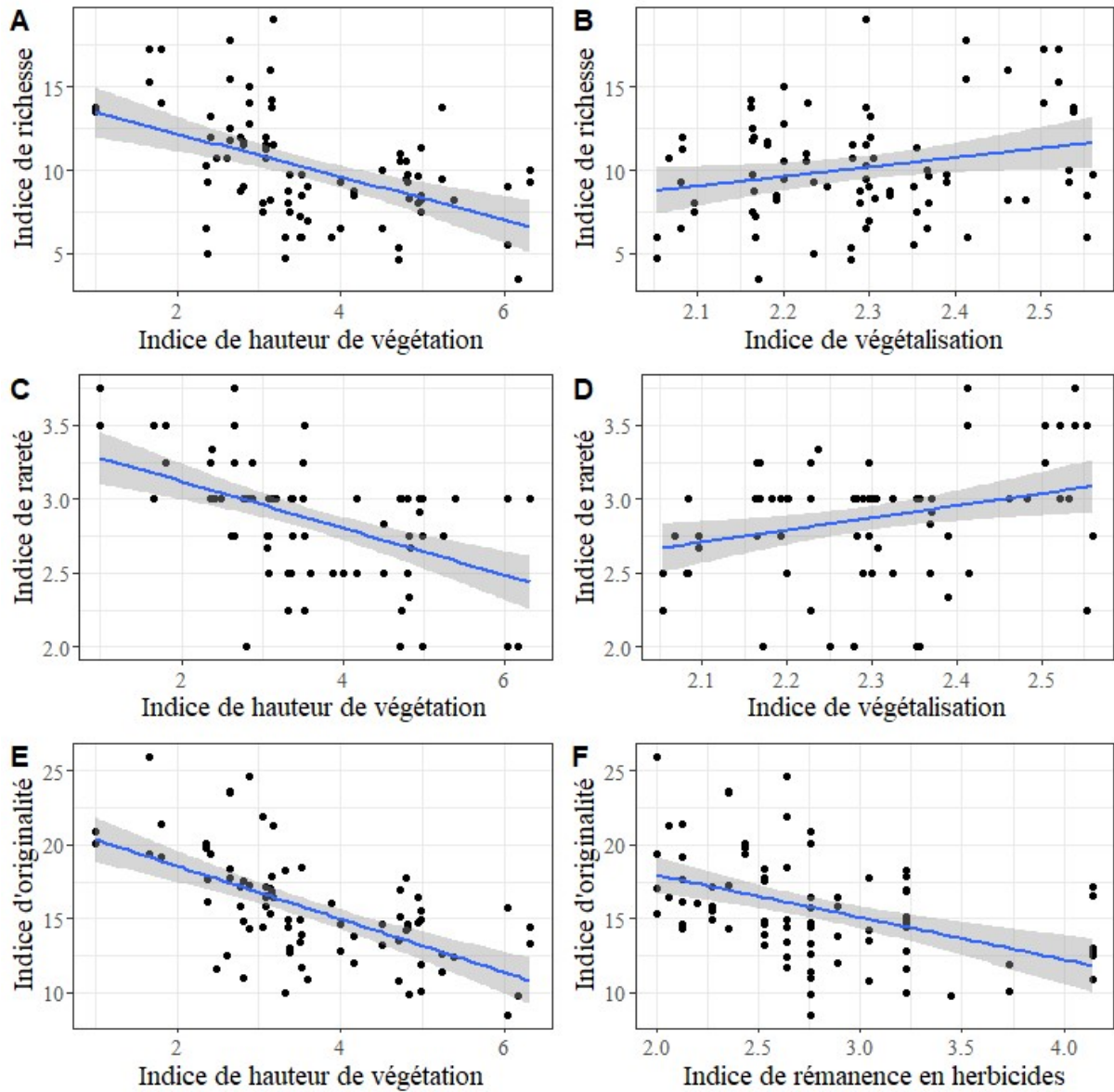
Indice	Variable explicative significative	P-value	Effet	Modèle
Richesse	Hauteur de végétation	0.006 **	–	AIC : 318.78
	Végétalisation	0.03 *	+	R ² : 39.6 %
Rareté	Hauteur de végétation	0.0007 ***	–	AIC : 431.73
	Végétalisation	0.003 **	+	R ² : 49.8 %
Originalité	Hauteur de végétation	0.0001 ***	–	AIC : 399.8
	Rémanence en herbicides	0.0006 ***	–	R ² : 67.3 %
Abondance	Aucune			AIC : 439.11 R ² : 23.2 %

Annexe 11 : OISEAUX – Représentation graphique des indices de biodiversité en fonction des variables explicatives significatives

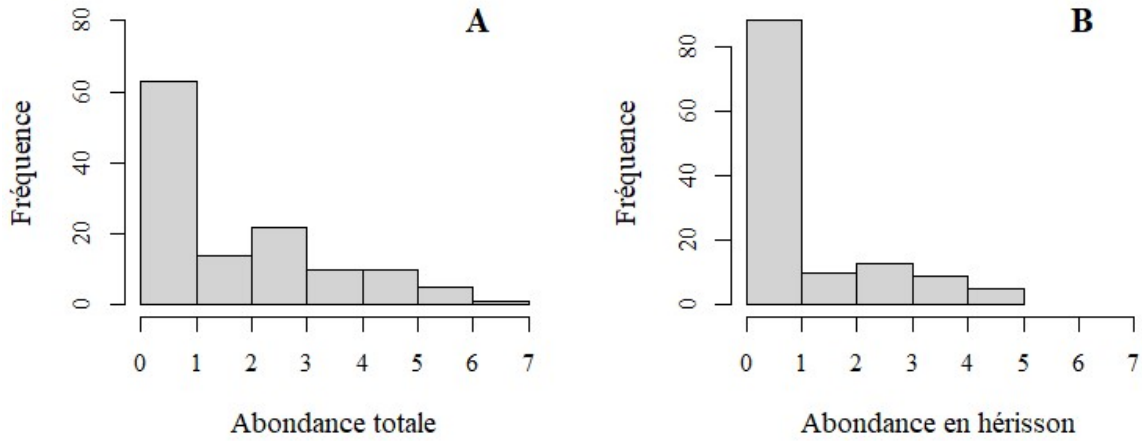
A et B : Richesse en fonction de la hauteur de végétation et de la végétalisation

C et D : Rareté en fonction de la hauteur de végétation et de la végétalisation

E et F : Originalité en fonction de la hauteur de végétation et de la rémanence en herbicides



Annexe 12 : PETITS MAMMIFERES – Distribution de la fréquence d’apparition des valeurs d’abondance totale hors chats (**A**) et d’abondance en hérisson (**B**) dans le jeu de données des cimetières



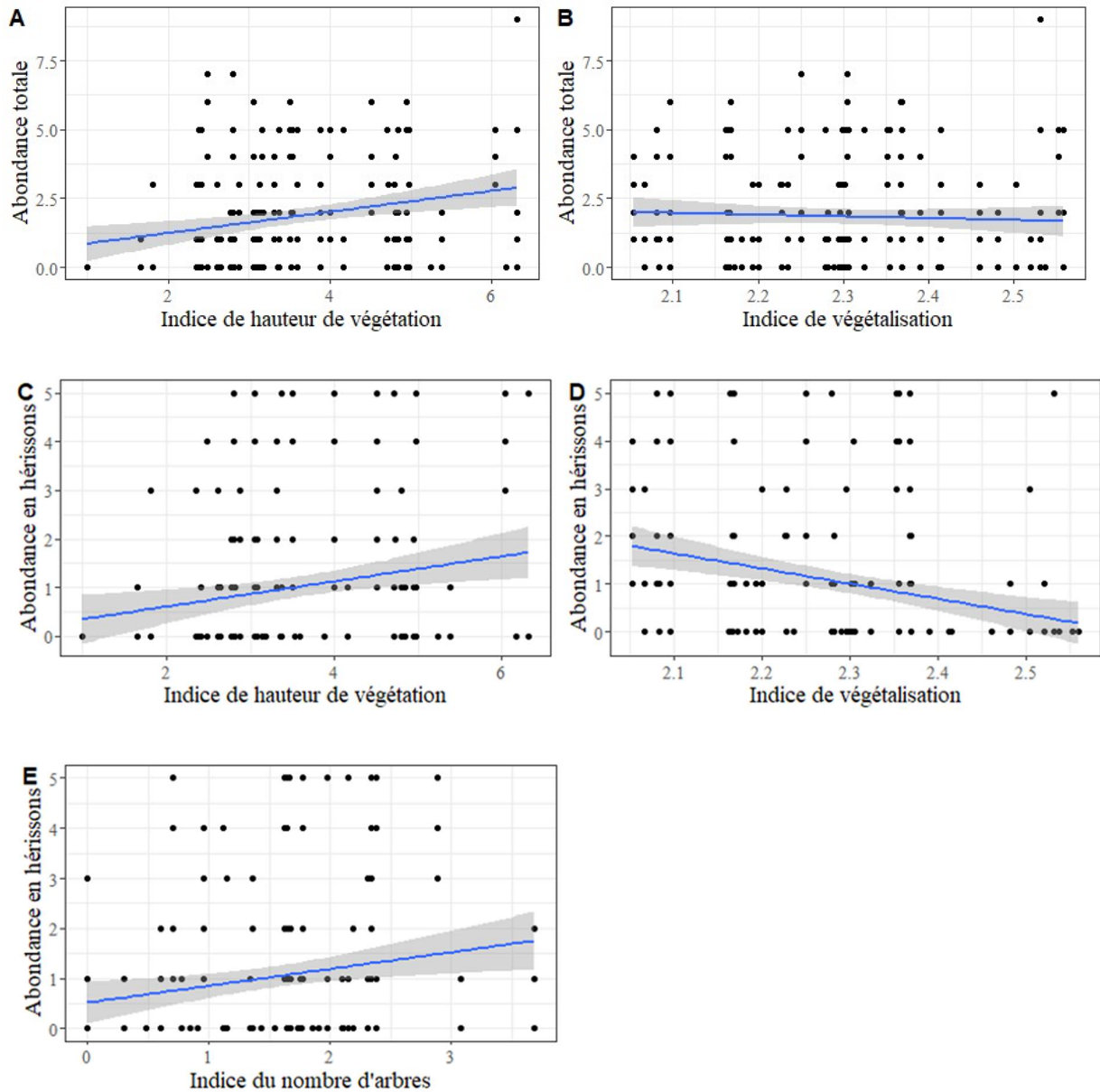
Annexe 13 : PETITS MAMMIFERES – Tableau récapitulatif des tests GLM et ZI

Indice	Variable explicative significative	P-value	Effet	Modèle
Abondance totale (GLM)	Hauteur de végétation	0.003 **	+	AIC : 659.05
	Végétalisation	0.021 *	-	R ² : 8.5 %
Abondance totale (ZI)	Hauteur de végétation	0.032 *	+	AIC : 642.99
	Végétalisation	0.004 **	-	R ² : 20.8 %
Abondance en hérisson (GLM)	Hauteur de végétation	0.015 *	+	AIC : 506.32
	Végétalisation	5.4e-06 ***	-	R ² : 26.2 %
	Nombre d'arbres	0.015 *	+	
Abondance en hérisson (ZI)	Végétalisation	0.005 **	-	AIC : 646.2 R ² : 21.4 %

Annexe 14 : PETITS MAMMIFERES – Représentation graphique des indices de biodiversité en fonction des variables explicatives significatives

A et B : Abondance totale (hors chats) en fonction de la hauteur de végétation et de la végétalisation

C, D et E : Abondance en hérissons en fonction de la hauteur de végétation, de la végétalisation et du nombre d'arbres



Annexe 15 : CHIROPTERES – Tableau récapitulatif des GLM

Indice	Variable explicative significative	P-value	Effet	Modèle
Richesse (PL)	Végétalisation	0.0008 ***	+	AIC : 407.5 R ² : 41.8 %
	Pollution lumineuse	0.0001 ***	–	
	Rémanence en herbicides	0.004 **	–	
	Couverture aquatique (500 m)	0.02 *	+	
Richesse (U)	Hauteur de végétation	9.5e-08 ****	–	AIC : 662.21 R ² : 42.2 %
	Gestion minérale	0.0001 ***	–	
	Urbanisation (1000 m)	0.003 **	–	
	Rémanence en herbicides	0.01 *	–	
Rareté (PL)	Pollution lumineuse	9.1e-09 ****	–	AIC : 250.22 R ² : 33.8 %
	Gestion minérale	0.002 **	–	
	Surface	0.006 **	–	
	Ancienneté	0.01 *	–	
Rareté (U)	Urbanisation (1000 m)	4.5e-05 ****	–	AIC : 478.74 R ² : 39.7 %
	Hauteur de végétation	9.3e-09 ****	–	
	Végétalisation	0.001 **	+	
	Ancienneté	0.003 **	–	
	Gestion minérale	0.003 **	–	
Rareté pondérée (PL)	Ancienneté	0.005 **	–	AIC : 305 R ² : 14.9 %
Rareté pondérée (U)	Hauteur de végétation	6e-12 ***	+	AIC : 492.61 R ² : 32 %
	Végétalisation	0.04 *	+	
Activité (PL)	Ancienneté	4.4e-06 ****	–	AIC : 41.084 R ² : 3.3 %
	Pollution lumineuse	0.01 *	–	
Activité (U)	Végétalisation	0.02 *	+	AIC : 60.4 R ² : 1.4 %

Annexe 16 : CHIROPTERES – Tableau récapitulatif des résultats des GLM par espèce

Indice	Variable explicative significative	P-value	Effet	Modèle
Activité Pipistrelle commune (PL)	Ancienneté	0.01 *	–	AIC : 52.27 R ² : 5.4 %
Activité Pipistrelle commune (U)	Urbanisation (500 m)	0.0001***	+	AIC : 79.9 R ² : 4.7 %
Occurrence Pipistrelle commune (PL)	Pollution lumineuse	0.02 *	+	AIC : 364 R ² : 18.2 %
Occurrence Pipistrelle commune (U)	Urbanisation (500 m)	0.0006***	+	AIC : 561 R ² : 9.9 %
Activité Pipistrelle de Kuhl (PL)	Végétalisation	0.009 **	+	AIC : 25.4 R ² : 2.7 %
Activité Pipistrelle de Kuhl (U)	Urbanisation (500 m)	0.0003***	+	AIC : 38.3 R ² : 18.9 %
	Surface	0.0003***	+	
	Gestion minérale	0.02 *	+	
Occurrence Pipistrelle de Kuhl (PL)	Couverture aquatique (500 m)	0.0005***	–	AIC : 270.9 R ² : 24.8 %
	Nombre d'arbres	0.002 **	+	
Occurrence Pipistrelle de Kuhl (U)	Surface	0.001 **	+	AIC : 446.7 R ² : 1.8 %
	Urbanisation (500 m)	0.007 **	+	
Activité de la Noctule commune (PL)	Aucune			AIC : 35.1 R ² : 3.1 %
Activité de la Noctule commune (U)	Aucune			AIC : 35.2 R ² : 2.6 %
Occurrence de la Noctule commune (PL)	Pollution lumineuse	0.008 **	–	AIC : 253.9 R ² : 18.6 %
	Surface	0.001 **	–	
Occurrence de la Noctule commune (U)	Aucune			AIC : 335.2 R ² : 4.4 %
Activité Sérotine commune (PL)	Pollution lumineuse	6e-05***	–	AIC : 21.1 R ² : 18.8 %
Activité Sérotine commune (U)	Ancienneté	0.02 *	+	AIC : 22.7 R ² : 5.8 %
Occurrence Sérotine commune (PL)	Pollution lumineuse	2e-10***	–	AIC : 210 R ² : 58.6 %
	Gestion minérale	1e-05***	+	
	Rémanence en herbicides	0.001 **	–	
	Couverture aquatique (1000 m)	0.003 **	–	
Occurrence Sérotine commune (U)	Ancienneté	0.02 *	+	AIC : 248 R ² : 10.3 %

Résumé

L'expansion et la densification urbaine a un impact non négligeable sur la biodiversité. En effet, la ville reste un milieu hostile en raison de la multitude de stress engendrée. Afin de mieux prendre en compte la biodiversité urbaine, une solution est de valoriser les espaces verts. Parmi eux, les cimetières présentent un fort potentiel d'accueil grâce à leur quiétude et leur végétalisation. L'ARB îdF a lancé en 2020 l'étude « Cimetières Vivants », sur 45 cimetières, pour une durée de 4 ans. Les objectifs sont de comparer les cimetières entre eux et avec les autres milieux et d'évaluer l'impact de différents facteurs sur la faune et la flore des cimetières. Pour cela, l'étude s'appuie sur des protocoles de sciences participatives pour 5 taxons : la flore, les insectes pollinisateurs, les oiseaux, les petits mammifères terrestres et les chauves-souris.

Les résultats obtenus démontrent qu'il existe des différences significatives de biodiversité entre les cimetières et les autres milieux. La flore retrouvée est plus riche, rare et originale et l'indice de rareté pour les chiroptères est plus important dans les cimetières. De plus, en milieu artificialisé, l'originalité en oiseaux est plus élevée dans les cimetières. Cette tendance s'inverse en milieu agricole. Les variables urbanisation, végétalisation et hauteur de végétation sont celles ressortant le plus régulièrement comme ayant un impact sur les indices de biodiversité.

Abstract

Urban expansion and densification have a significant impact on biodiversity. Indeed, the city remains a hostile environment due to the multitude of stresses it generates. In order to take better account of urban biodiversity, one solution is to enhance green spaces. Cemeteries, in particular, offer great potential for hosting biodiversity, thanks to their peacefulness and vegetation. In 2020, ARB îdF launched the "Cemeteries: Observation of Life" study, covering 45 cemeteries over a 4-year period. The objectives are to compare cemeteries with each other and with other environments, and to assess the impact of various factors on cemetery flora and fauna. To achieve this, the study is based on participatory science protocols for 5 taxa: flora, pollinating insects, birds, small terrestrial mammals and bats.

The results show that there are significant differences in biodiversity between cemeteries and other environments. The flora found is richer, rarer and more original, and the rarity index for chiropterans is higher in cemeteries. In addition, in artificial environments, bird originality is higher in cemeteries. This trend is reversed in agricultural environments. The variables urbanisation, vegetation cover and height of vegetation are those most often identified as having an impact on biodiversity indices.