

Projet Recherche Innovation (PRI) 2024-2025

Effet d'héritage (Legacy Effect) des parcs photovoltaïques sur l'évolution d'espèces cibles et indicatrices



Figure 1 : Parc photovoltaïque de Sonzay, janvier 2024

Effet d'héritage (Legacy Effect) des parcs photovoltaïques sur l'évolution d'espèces cibles et indicatrices :

Évolution sur plusieurs années des espèces présentes initialement sur les sites

Louison Bienvenu

Emma DIDIER

2024-2025

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur de cette recherche a signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier avant tout mon encadrant, Louison Bienvenu, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son aide précieuse chaque fois que j'en avais besoin.

Un grand merci à Mme Greulich Sabine, qui a fourni le code R permettant d'identifier les espèces indicatrices.

Je suis également reconnaissante envers mes parents, qui m'ont apporté un moral essentiel, notamment pour me soutenir à distance quand je cherchais l'emplacement des parcs et qui ont passé du temps à relire mon rapport et à essayer de m'envoyer un lien.

En dernier, je remercie ma sœur, qui, de manière totalement bénévole, a réussi à m'envoyer ce fameux lien, à partir d'un téléphone récalcitrant, finalement pas si essentiel que ça pour ce travail.

SOMMAIRE

AVERTISSEMENT	3
FORMATION.....	4
REMERCIEMENTS	5
SOMMAIRE	6
TABLE DES FIGURES	7
INTRODUCTION.....	9
LEGACY EFFECT	9
PARCS PHOTOVOLTAÏQUES.....	11
MATERIEL ET METHODE	13
DONNEES.....	13
SITES D'ETUDE	14
DESIGN DES PARCS.....	15
ANALYSES	16
1. <i>Indices de Biodiversité et espèces exotiques</i>	16
2. <i>Traits fonctionnels</i>	18
3. <i>Espèces indicatrices</i>	19
4. <i>Tests et calculs réalisés</i>	20
RESULTATS.....	24
INDICES DE BIODIVERSITE ET ESPECES EXOTIQUES	24
<i>Richesse spécifique</i>	24
<i>Indice de Shannon</i>	27
<i>Indice de Simpson</i>	30
<i>Indice de Piélou</i>	32
<i>Espèces exotiques</i>	35
TRAIT FONCTIONNEL.....	38
ESPECES INDICATRICES.....	50
DISCUSSION	55
INFLUENCE DU MILIEU D'ORIGINE.....	55
IMPACTS TEMPORELS	56
VARIABLES ADDITIONNELLES POUR EXPLIQUER LES RESULTATS	57
CONCLUSION	59
BIBLIOGRAPHIE.....	60
ANNEXES	62

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 : PARC PHOTOVOLTAÏQUE DE SONZAY, JANVIER 2024	1
FIGURE 2 : LOCALISATION DES PARCS	14
FIGURE 3 : DESIGN D'UN PARC.....	15
FIGURE 4 : EVALUATION DE LA SURDISPERSION - S.....	24
FIGURE 5 : PREDICTIONS MARGINALES MOYENNES - S	25
FIGURE 6 : BOXPLOTS DE LA RICHESSE FLORISTIQUE SELON LE MILIEU ET L'ANNEE	25
FIGURE 7 : NORMALITE DES RESIDUS - S	25
FIGURE 8 : RICHESSE SPECIFIQUE PAR MILIEU AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES)	26
FIGURE 9 : RICHESSE SPECIFIQUE PAR DATE AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES)	26
FIGURE 10 : EVALUATION DE LA SURDISPERSION - SHANNON.....	27
FIGURE 11 : PREDICTIONS MARGINALES MOYENNES - SHANNON	27
FIGURE 12 : BOXPLOTS DE SHANNON SELON LE MILIEU ET L'ANNEE	28
FIGURE 13 : NORMALITE DES RESIDUS - SHANNON.....	28
FIGURE 14 : SHANNON PAR MILIEU AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES).....	29
FIGURE 15 : SHANNON PAR DATE AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES).....	29
FIGURE 16 : EVALUATION DE LA SURDISPERSION - SIMPSON.....	30
FIGURE 17 : PREDICTIONS MARGINALES MOYENNES - SIMPSON	30
FIGURE 18 : BOXPLOTS DE SIMPSON SELON LE MILIEU ET L'ANNEE.....	31
FIGURE 19 : NORMALITE DES RESIDUS - SIMPSON	31
FIGURE 20 : SIMPSON PAR MILIEU AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES)	31
FIGURE 21 : SIMPSON PAR DATE AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES)	32
FIGURE 22 : EVALUATION DE LA SURDISPERSION - PIELOU	32
FIGURE 23 : PREDICTIONS MARGINALES MOYENNES - PIELOU	33
FIGURE 24 : BOXPLOTS DE PIELOU SELON LE MILIEU ET L'ANNEE	33
FIGURE 25 : NORMALITE DES RESIDUS - PIELOU.....	33
FIGURE 26 : PIELOU PAR MILIEU AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES).....	34
FIGURE 27 : PIELOU PAR DATE AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES).....	34
FIGURE 28 : NOMBRE D'ESPECES NATIVES ET EXOTIQUES PAR PARC.....	35
FIGURE 29 : BOXPLOTS DE L'ABONDANCE D'ESPECES EXOTIQUES SELON LE MILIEU ET L'ANNEE.....	36
FIGURE 30 : NORMALITE DES RESIDUS - SP EXOTIQUES	36
FIGURE 31 : BOXPLOTS DES ESPECES EXOTIQUES SELON LE MILIEU/QUADRAT ET L'ANNEE	36
FIGURE 32 : ESPECES EXOTIQUES PAR MILIEU/QUADRAT AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES)	37
FIGURE 33 : ESPECES EXOTIQUES PAR DATE AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES).....	37
FIGURE 34 : BOXPLOTS DES VALEURS D'ELLENBERG POUR LES PARCS B.....	38
FIGURE 35 : BOXPLOTS DES VALEURS D'ELLENBERG POUR LES PARCS A.....	38
FIGURE 36 : MOYENNES PONDEREE DES VALEURS D'ELLENBERG	39
FIGURE 37 : MDS ENTRE LES MOYENNES DES VALEURS D'ELLENBERG	39
FIGURE 38 : ACP ENTRE LES MOYENNES DES VALEURS D'ELLENBERG.....	40
FIGURE 39 : BOXPLOTS DE LA VALEUR LUMIERE SELON LE MILIEU ET L'ANNEE.....	41
FIGURE 40 : NORMALITE DES RESIDUS - LUMIERE.....	41
FIGURE 41 : BOXPLOTS DE LA VALEUR pH SELON LE MILIEU ET L'ANNEE	42
FIGURE 42 : NORMALITE DES RESIDUS - pH.....	42
FIGURE 43 : BOXPLOTS DE LA VALEUR NUTRIMENT SELON LE MILIEU ET L'ANNEE	43
FIGURE 44 : NORMALITE DES RESIDUS - pH.....	43
FIGURE 45 : BOXPLOTS DE LA VALEUR HUMIDITE DU SOL SELON LE MILIEU ET L'ANNEE.....	44
FIGURE 46 : NORMALITE DES RESIDUS - HUMIDITE SOL	44
FIGURE 47 : BOXPLOTS DE LA VALEUR TEMPERATURE SELON LE MILIEU ET L'ANNEE.....	45
FIGURE 48 : NORMALITE DES RESIDUS - TEMPERATURE	45
FIGURE 49 : BOXPLOTS DE LA VALEUR MATIERE ORGANIQUE SELON LE MILIEU ET L'ANNEE.....	46
FIGURE 50 : NORMALITE DES RESIDUS - MO	46
FIGURE 51 : NMDS DES VALEURS D'ELLENBERG SELON LE MILIEU D'ORIGINE	47

FIGURE 52 : NMDS DES VALEURS D'ELLENBERG SELON LA DATE	47
FIGURE 53 : NMDS DES VALEURS D'ELLENBERG SELON LE MILIEU D'ORIGINE - PARCS A	48
FIGURE 54 : NMDS DES VALEURS D'ELLENBERG SELON LE MILIEU D'ORIGINE - PARCS B	48
FIGURE 55 : NOMBRE ET TYPE D'ESPECES INDICATRICES PAR STATION	50
FIGURE 56 : NOMBRE ET TYPE D'ESPECES INDICATRICES PAR PARC	50
FIGURE 57 : NOMBRE ET TYPE D'ESPECES INDICATRICES PAR MILIEU	50
FIGURE 58 : BOXPLOTS DU NOMBRE D'SP INDICATRICES SELON LE MILIEU ET L'ANNEE	51
FIGURE 59 : NORMALITE DES RESIDUS - SP INDICATRICES	51
FIGURE 60 : BOXPLOTS DES SP "FORETS" SELON LE MILIEU ET L'ANNEE.....	52
FIGURE 61 : NORMALITE DES RESIDUS - FORET	52
FIGURE 62 : BOXPLOTS DES SP "FRICHES" SELON LE MILIEU ET L'ANNEE	52
FIGURE 63 : NORMALITE DES RESIDUS - FRICHE.....	52
FIGURE 64 : SP "FORETS" PAR MILIEU AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES).....	53
FIGURE 65 : SP "FORETS" PAR DATE AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES).....	53
FIGURE 66 : SP "FRICHES" PAR MILIEU AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES)	54
FIGURE 67 : SP "FRICHES" PAR MILIEU AVEC TESTS DE SIGNIFICATIVITE (P-VALUES)	54

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : DESCRIPTION DES PARCS	13
TABLEAU 3 : MOYENNES DES INDICES DES QUADRATS PAR MILIEUX.....	24
TABLEAU 2 : MOYENNES DES INDICES DES QUADRATS PAR DATES	24
TABLEAU 4 : MOYENNES D'ESPECES LOCALES ET INTRODUITES PAR PARC.....	35
TABLEAU 5 : RATIO DE LA MOYENNE PAR PARC D'ESPECES EXOTIQUES DANS CHAQUE MILIEU	35
TABLEAU 6 : RESULTATS DES PERMANOVA (P-VALUE ET R ²)	49

INTRODUCTION

LEGACY EFFECT

Le **Legacy Effect** (LE), ou effet d'héritage en français, désigne l'héritage laissé par un milieu précédent, influençant durablement les caractéristiques biotiques et abiotiques du milieu actuel. Ces impacts peuvent persister bien après la disparition de l'espèce causale ou la fin de l'activité associée. Le LE joue un rôle clé dans la gestion écologique des milieux naturels et semi-naturels, car il conditionne l'évolution future des écosystèmes.

La définition qui sera utilisée par la suite de ce travail est celle de Perry, en 2008 : L'effet d'héritage est tout ce qui est hérité d'un écosystème passé et influence la trajectoire de succession du système actuel¹.

Ce concept large inclut les résidus biologiques (comme les graines, nutriments ou mycorhizes) et les changements abiotiques laissés par des écosystèmes ou espèces passés. Il offre une base solide pour examiner de quelle manière les milieux précédents façonnent la structure et la dynamique des communautés actuelles.

Le concept d'effet d'héritage est relativement récent et peut présenter différentes définitions mais s'appuie sur des travaux plus anciens.

- **Années 1950 à 1990 :**
 - Franck E. Egler (1954) établit la théorie de la **Composition Floristique Initiale**, montrant que l'ordre d'installation des communautés après une perturbation détermine leur succession future.
 - Les premières études liées au concept du LE ont montré la persistance de modifications abiotiques (par ex. altération du sol) et de communautés biologiques résiduelles après une perturbation (Cuddington, 2012).
- **Années 1990 : naissance explicite du terme**
 - En 1990, le terme "Legacy Effect" apparaît pour la première fois dans les travaux écologiques. Il est utilisé pour décrire :
 - Les perturbations causées par des **espèces exotiques envahissantes (EEE)** qui modifient durablement leur environnement même après leur disparition.

¹ Storage is basically a legacy effect and refers to the ability of an organism to "store" its presence on a site, especially persistence in some form through disturbance (e.g., clonal life-forms in plants) (Perry, 2008).

- Les impacts des **animaux herbivores**, comme le surpâturage, sur la structure des sols et des communautés végétales.
- Une hypothèse forte du LE se développe : les successions écologiques dans des milieux aux caractéristiques similaires tendraient vers un même écosystème stable, indépendamment des perturbations initiales.
- **2005 à aujourd'hui : un cadre élargi**
 - Le LE inclut désormais l'idée que les espèces pionnières influencent non seulement la succession biogéochimiques.
 - Les travaux récents soulignent aussi le rôle des mycorhizes : leurs interactions avec les racines végétales (accès à l'eau et aux nutriments) accélèrent la colonisation végétale dans des milieux altérés.

Le LE est étroitement lié à des concepts comme :

- **Succession écologique** : Le milieu originel, via ses caractéristiques biotiques et abiotiques, détermine la vitesse et la trajectoire de la succession écologique du milieu actuel.
- **Décalage temporel** : Le LE agit comme un facteur ralentissant ou accélérant les transitions dans un écosystème. Le milieu originel n'impacterait pas les éléments d'un écosystème mais la vitesse à laquelle se produisent les événements naturels. Ainsi, par exemple, après la disparition totale d'EEE, le milieu sera encore impacté et cela accélérera la survenue d'autres EEE.
- **Impacts persistants des espèces pionnières** : En altérant les sols ou la composition des communautés, ces espèces influencent fortement les stades successifs suivants.

Ces interactions montrent que le Legacy Effect dépasse la seule notion d'impact direct : c'est un mécanisme qui perdure dans le temps et qui implique que nombreuses notions.

Le Legacy Effect s'applique dans divers contextes écologiques, notamment pour comprendre comment des perturbations humaines modifient durablement les écosystèmes. C'est le cas des parcs photovoltaïques, dont la création induit des modifications profondes des écosystèmes tout en étant influencées par les caractéristiques des milieux d'origine.

PARCS PHOTOVOLTAÏQUES

L'énergie solaire est une des moins émettrice de gaz à effet de serre. En effet, avec ses 23 gCO₂ eq/kWh (pour les régions du sud, 40 dans le nord), elle se situe juste derrière l'éolien (13) et le nucléaire (16)(ADEME, 2023). Cependant, contrairement à ces deux dernières énergies, le solaire est à l'origine de moins de controverses écologiques. Un parc, avec ses 25 à 40 % de sa surface couverte de panneaux, impact principalement le milieu naturel (ADEME, 2023 ; Moign, 2023) :

- **Par son emprise foncière** : Sa surface est peu imperméabilisée mais très artificialisée
- **Sur le sol et les habitats pendant et après les travaux** : la séquence ERC (Eviter, Réduire, Compenser) s'applique pour éviter, limiter ou compenser ces dommages
- **En modifiant le cortège floristique** : par les aspects physiques et de design du parc (hauteur des panneaux, distance inter-panneaux, linéaire de piste, etc.), par la création d'un microclimat, durant les travaux, sur la gestion de la végétation (exemple avec la fauche ou le pâturage), etc. De manière générale, durant les premières années d'un parc, la colonisation végétale est assurée, comme pour la majeure partie des nouveaux systèmes écologiques, par des espèces dites pionnières, qui sont rudérales et communes. Si aucune mesure n'est proposée et appliquée, le parc sera dépourvu d'espèces locales et, au contraire, sera envahi par des EEE.
- **En limitant la capacité de dispersion** par les clôtures des organismes mobiles
- **En augmentant la mortalité** : certains organismes chassant ou vivant au niveau de surfaces d'eau peuvent confondre les panneaux, de par leur effet polarisant, avec un lac par exemple. En voulant chasser, ils rentrent en collision avec le panneau, c'est le cas des chiroptères. Certains insectes peuvent aussi, en les confondant, pondre des œufs à leur surface. Œufs qui n'éclore donc jamais, faute d'eau. Des mesures peuvent réduire cet effet polarisant, et donc limiter le risque que le panneau soit confondu avec une surface d'eau, par exemple en ajoutant un texturage ou des bandes blanches pour couper la linéarité. Il est préférable d'éviter l'installation d'un parc à proximité d'une zone humide.

Avec un besoin en électricité qui augmente en France selon une enquête de l'ADEME et une conscience écologique de plus en présente, la **demande d'énergie plus verte** est recherchée par les consommateurs (RTE, 2022 ; ADEME ; 2024 ; négaWatt, 2022). L'énergie solaire est donc une des premières à être citée. Cependant, comme dit précédemment, il ne s'agit pas d'une méthode sans défaut. Pour les limiter, il faut déjà les identifier avec le protocole BACI (Before-After-Contol-Impact, comparaison avant-après et site témoin). Le principe est d'avoir une gestion adaptée, qui peut être mise en place grâce à des connaissances solides (ADEME, 2023). Cependant, dans l'état actuel de la recherche, rien ne permet de quantifier **l'influence du milieu originel sur lequel se situe le parc**, ce qui pourrait être appelé l'effet d'héritage du milieu originel sur la composition floristique du parc. Il serait intéressant de se demander quel est le milieu originel qui permet à un parc d'avoir la plus grande diversité floristique possible, le ratio espèces locales/introduites le plus bas, etc.

La question qui émerge alors de ces recherches est donc de savoir comment les effets d'héritage du milieu originel impactent les communautés végétales, aussi bien en termes d'espèces locales et exotiques qu'en termes d'espèces indicatrices, des parcs solaires en cours d'exploitation. Dans quelle mesure le milieu d'origine détermine-t-il la composition floristique d'un parc photovoltaïque au fil du temps ? **Comment les effets d'héritage impactent-ils les communautés végétales des parcs photovoltaïques ?** Cela reviendra à savoir s'il existe un écosystème typique des parcs photovoltaïques, peu importe le milieu d'origine, ou si ce même milieu influence, même après sa disparition, le parc. L'hypothèse serait que des espèces cibles du milieu originel ainsi que des espèces plus locales peuvent se retrouver dans un parc quand celui-ci est jeune mais, plus le temps passe, plus une homogénéisation a lieu à la suite de la gestion du parc, rendant l'influence du milieu originel moins important. **Le milieu originel influence la composition floristique et cet impact est plus marqué dans les parcs récents.** Après une analyse générale des relevés et celle des traits fonctionnels retrouvés sur chaque quadrats, les espèces indicatrices de chaque parc seront comparées. Cela permettra en premier lieu d'observer, ou non, des différences significatives entre les parcs en termes de nombre d'espèces et de ratio espèces locales/introduites, puis de voir si des groupes de quadrats se créent en fonction de la végétation présente. Le but alors sera de dégager une théorie, pouvant expliquer ces différences, basée sur les types de milieu originel des sites.

MATERIEL ET METHODE

DONNEES

L'ensemble des données proviennent de l'entreprise **Engie Green Nantes**, fournit par M. Louison BIENVENU², encadrant de ce PFE. Les relevés floristiques ont été menés en mai 2024 dans des quadrats de 1m².

Les données ont été fournies sous forme de tableau de relevé. Deux groupes de quatre parcs ont été répertoriés avec chaque parcs 10 relevés multipliés par deux, pour avoir un en bordure et un sous panneau. Le groupe A comptait 72 quadrats (les parcs A2 et A3 ne comptent que 8 stations) pour 125 relevés dont 98 espèces confirmées et le groupe B 80 quadrats, 97 relevés et 91 espèces, avec au total **145 espèces différentes pour 169 relevés**. Par manque de précision, certains relevés ont dû être supprimés ce qui explique la différence entre le nombre de relevés et le nombre d'espèces totales. Pour chaque parc, sa localisation, sa superficie, sa date de création, son type de gestion et son historique (le type de milieu avant son installation) sont connus.

Tableau 1 : Description des parcs

Parc	Localisation	Milieu originel	Date	Gestion	Superficie (ha)	Nbr d'espèces
A1	Saint Germain	Forêt (pin/chêne)	2016	Fauche	17,4	22
A2	Sadirac	Carrière (en forêt, ZH)	2016	Fauche	7,2	62
A3	Sadirac	Forêt (ZH)	2016	Fauche	7,2	52
A4	Salunes	Forêt (pinède, lande)	2017	Fauche, pâturage	127	18
B1	Auros	Industriel (bâtiment, prairie)	2019	Pâturage	8,5	53
B2	Communal Ouest	Forêt	2021	Pâturage	26	38
B3	Sanguinet Nord	Forêt	2017	Pâturage	26,4	36
B4	Sanguinet Sud	Forêt	2019	Pâturage	24,8	37

² CITERES – UMR 7432 CNRS, Université de Tours, France / IMBE – UMR 7263 CNRS, Université Avignon, France / Engie Green

SITES D'ETUDE

Les parcs se situent en **Nouvelle-Aquitaine**, dans le Sud-Ouest de la France, dans les départements de la Gironde (communes de Saint-Germain, Salaunes, Sadirac et Auros) et des Landes (communes de Sanguinet et Sore/Communal Ouest).

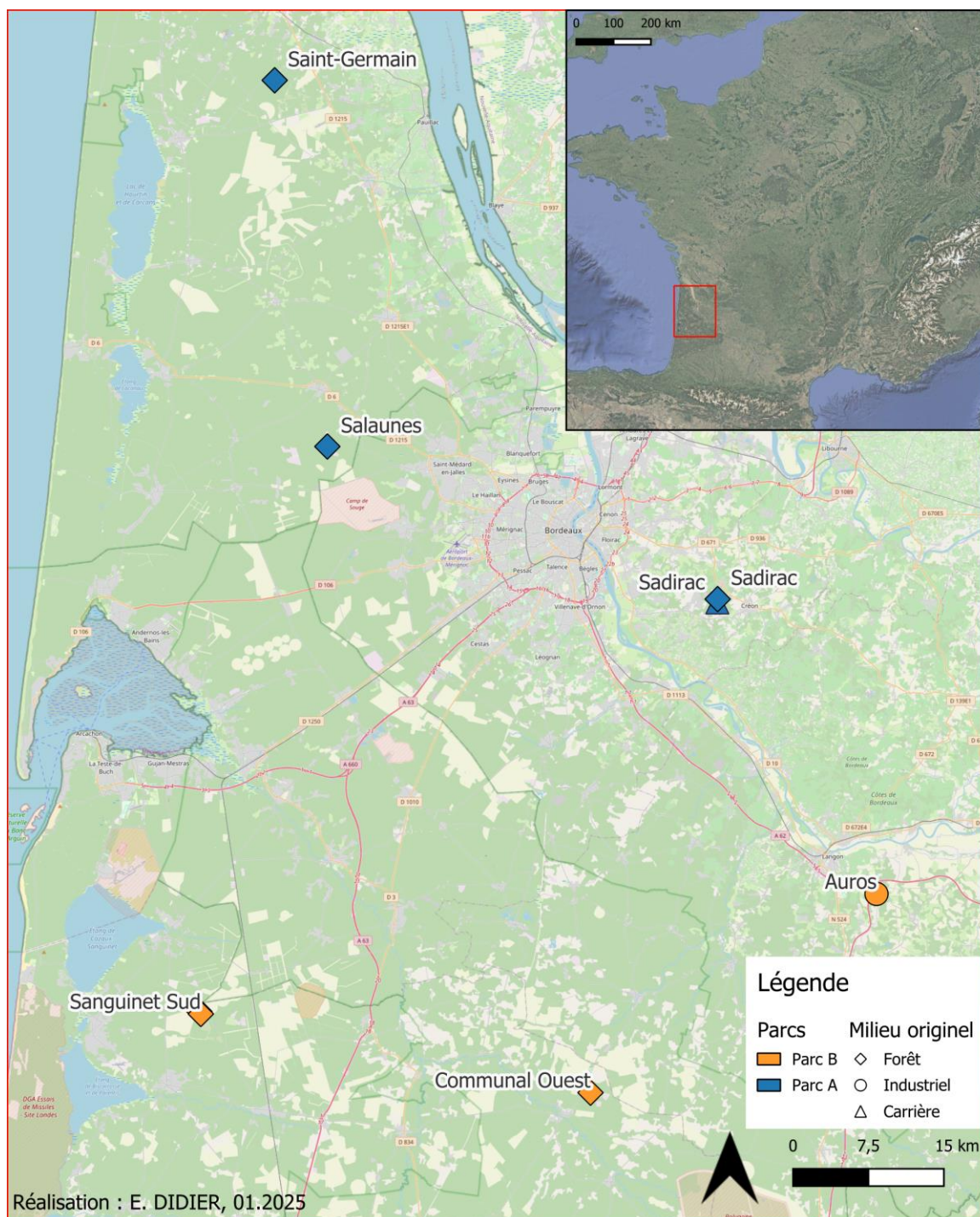


Figure 2 : Localisation des parcs

DESIGN DES PARCS

Les parcs dans lesquels ont eu lieu les relevés sont des centrales solaires à champs libre statiques. Deux types de relevés ont été réalisés : il s'agit des quadrats en **Bordure** et **Sous-Panneau**. Cela correspond à la position des relevés dans le parc, soit à côté des panneaux (Bordure) soit en dessous (Sous-Panneau).

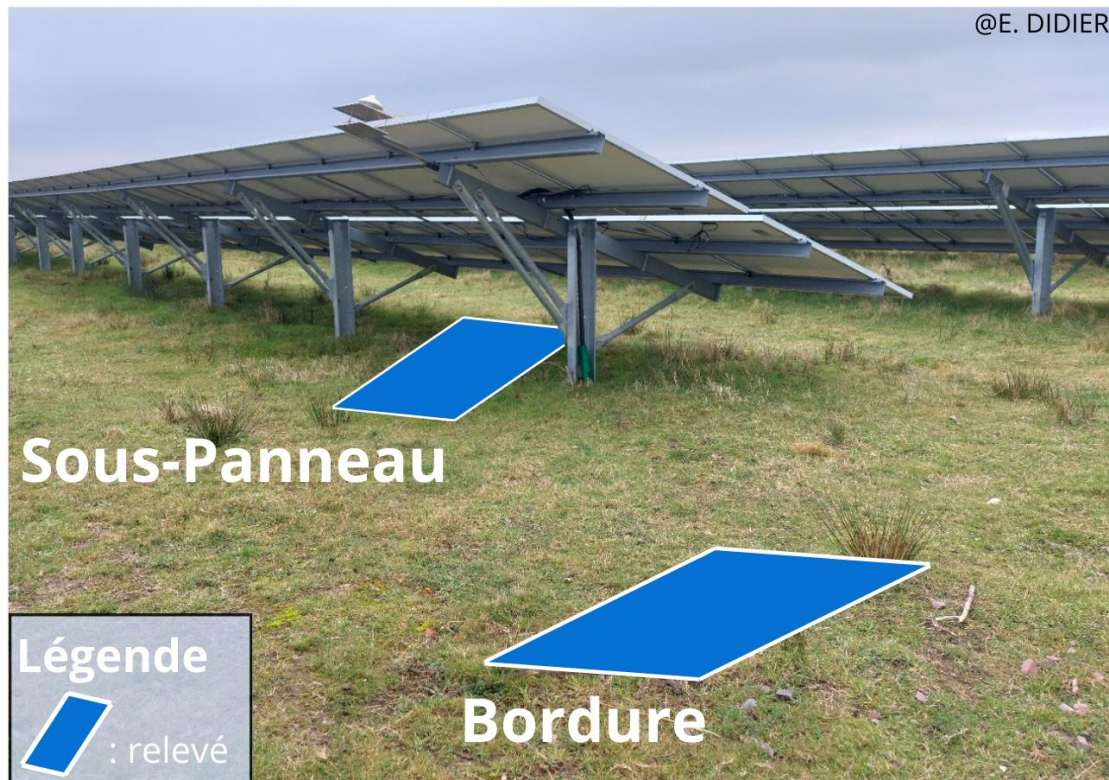


Figure 3 : Design d'un parc

ANALYSES

1. INDICES DE BIODIVERSITÉ ET ESPECES EXOTIQUES

Plusieurs indices ont été calculés pour rendre compte au mieux de **l'état de biodiversité** de chaque parc.

1.1 Richesse Spécifique

La richesse spécifique correspond au **nombre total d'espèces** dans un milieu. Notée S , dans cette étude, elle a été trouvée à l'aide du package vegan et de la fonction specnumber de R (Annexe 1).

1.2 Indice de Shannon

L'indice de Shannon permet de mesurer la **diversité spécifique** d'un peuplement en tenant compte de la probabilité de rencontrer une espèce donnée parmi un ensemble d'espèces présentes. En écologie, ce concept s'applique aux espèces composant une communauté ou un peuplement. Dans le cas de cette étude, il s'agit des parcs, des stations ou des quadrats.

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$$

- p_i : Abondance proportionnelle d'une espèce ($p_i = n_i/N$)
- n_i : Nombre d'individus pour une espèce donnée
- N : Nombre total d'individus
- S : Nombre total d'espèces (richesse spécifique)

Cet indice exprime la diversité spécifique : une communauté composée d'une seule espèce a une valeur $H'=0$ (homogénéité complète). En revanche, la valeur de H' augmente quand le nombre d'espèces différentes augmente et que leur abondance devient plus équilibrée. Il est nécessaire pour calculer l'indice de Pielou. Cet indice a été calculé sous R avec le package vegan et la fonction diversity (Annexe 2).

1.3 Indice de Simpson

Parmi les outils permettant d'évaluer la biodiversité, il existe aussi l'indice de Simpson, également connu sous le nom d'indice de dominance. Cet indice exprime la **probabilité que deux individus choisis aléatoirement dans un échantillon appartiennent à la même espèce**. Il

accorde davantage de poids aux espèces abondantes par rapport à celles qui sont rares : l'ajout d'une espèce rare à l'échantillon impactera très peu la valeur de cet indice de diversité.

$$D = \sum_{i=1}^S p_i^2$$

- p_i : Abondance proportionnelle d'une espèce ($p_i = n_i/N$)
- n_i : Nombre d'individus pour une espèce donnée
- N : Nombre total d'individus
- S : Nombre total d'espèces (richesse spécifique)

Dans cette forme, l'indice est inversement proportionnel à la diversité, c'est-à-dire que des valeurs élevées de D traduisent une faible diversité. Pour mieux refléter directement la diversité, une autre formule est proposée. C'est celle qui sera calculée grâce à la fonction diversity du package vegan de R (Annexe 3).

$$E = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2$$

L'indice de Simpson ainsi ajusté varie entre 0 et 1.

- Lorsque la diversité est minimale (une seule espèce présente), l'indice tend vers 0 ($p_i=1$).
- Lorsque la diversité est maximale, il atteint une valeur proche de $1-1/S$, avec $p_i=1/S$ pour chaque espèce.

1.4 Indice de Piélou

L'indice de Piélou est utile pour **comparer les dominances** potentielles entre différents sites ou groupes floristiques. Contrairement à l'indice de Shannon, il permet d'évaluer les déséquilibres au sein des peuplements ou groupements floristiques. Une valeur proche de 1 reflète un peuplement où les espèces sont équitablement réparties. Cet indice mesure le degré de diversité d'un peuplement en rapportant la diversité réelle, représentée par l'indice de Shannon (H'), à la diversité théorique maximale ($H_{\max}$) :

$$R = \frac{H'}{H_{\max}}$$

- H' : Indice de Shannon
- $H_{\max}$: Logarithme népérien de S
- S : Nombre total d'espèces (richesse spécifique)

Les valeurs de R varient de 0 à 1. Une valeur proche de 1 indique une répartition homogène des abondances entre les espèces, où chaque espèce est représentée par un nombre similaire

d'individus. À l'inverse, des valeurs proches de 0 traduisent une forte dominance, cela signifie que la majorité des individus appartient à une seule espèce.

Sous R, il n'existe pas de fonction pour calculer cet indice directement. Il faut pour cela utiliser l'indice de Shannon, dont les résultats sont enregistrés dans R, et la richesse spécifique, également enregistrée (Annexe 4).

1.5 Espèces exotiques

Pour connaître le statut de chaque espèce, une recherche bibliographique a été menée sur le site de Télébotanica (Annexe 5) puis sur celui de l'IUCN (Annexe 6). Le ratio d'espèces exotiques a été calculé en divisant le nombre d'espèces introduites en France par celui d'espèces natives pour chaque peuplement.

2. TRAITS FONCTIONNELS

Pour chaque espèce, une recherche bibliographique a été menée pour connaître ses **valeurs d'Ellenberg** selon M. Julves et son code **Catminat** (type d'habitat). Pour cela, les données de TéléBotanica, pour les valeurs d'Ellenberg et le code Catminat ont été exploitées (Annexe 7 Annexe 8).

Les valeurs d'Ellenberg proviennent de "Ellenberg, H., & coll. 1992, Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa, Scripta Geobotanica, 18 : 258 p.". Elles répartissent les espèces végétales en 9 classes, de -4 à 4, pour 10 facteurs écologiques : La lumière, l'humidité atmosphérique et édaphique, la température, la continentalité, le pH, la texture, la salinité et la matière organique. Grâce à celles-ci, il est possible de comparer plusieurs sites en fonction de leur relevés floristiques. Quand les tests ne permettaient pas les données négatives, les valeurs renseignées ont été additionnées par 4 (classes de 0 à 8).

3. ESPECES INDICATRICES

La sélection des espèces indicatrices repose souvent sur une **analyse des liens entre leurs occurrences ou abondances** sur différents sites échantillonnés et une classification de ces mêmes sites en groupes. Deux types de données sont donc nécessaires pour une telle analyse :

- Une **matrice de données de communauté**, qui représente les sites (vecteurs, en lignes) et les espèces (en colonnes).
- Un **vecteur** qui décrit la classification des sites en groupes. Pour réaliser une analyse des espèces indicatrices, il faut un vecteur contenant la classification des sites en groupes. Plusieurs groupes de ce type ont été élaborés pour cette étude : par station, par parc et par ancien type d'habitat.

Une fois ces données disponibles, l'analyse des espèces indicatrices peut être réalisée à l'aide de la fonction `multipatt` du package `indicspecies` sous R (Annexe 9). Cette méthode identifie les espèces associées à des groupes spécifiques de sites ou à des combinaisons de ces derniers.

Pour déterminer les espèces indicatrices d'un groupe donné, une approche fréquemment utilisée est celle de la **Valeur Indicatrice** (IndVal), développée par Dufrêne et Legendre (1997). Cet indice quantifie l'association entre une espèce et un groupe de sites en recherchant celui avec la valeur d'association maximale. La pertinence statistique de cette relation est ensuite testée via un test de permutation.

Une fois l'analyse réalisée, les espèces indicatrices correspondant à chaque groupe de sites (ou combinaisons de groupes) sont identifiées. Ces résultats sont ensuite copiés sur Excel. Avec les données de la baseflore, un **type d'habitat** est renseigné pour chaque espèce indicatrice. Cette donnée est ensuite simplifiée pour donner un habitat plus générique. Par exemple, “annuelles commensales des cultures basophiles” est mentionné comme étant une “Friche agricole”. Cette simplification permet de comparer les différents groupes entre eux, un type d'habitat issu de la baseflore étant très précis, ne revenant que pour un petit nombre d'espèces (voir une seule espèce), ce qui ne permettait pas de comparer les sites.

Le premier vecteur qui a été réalisé était pour chaque type de relevés par parc (par exemple l'ensemble des relevés sous-panneau du parc A1 = F(A1)S). 16 groupes ont alors été concernés. Par la suite, l'information Bordure et Sous-panneau a été cachée pour permettre d'avoir les 8 groupes correspondants aux parcs. La dernière analyse a été faite en ne gardant que le type d'habitat originel. 3 groupes ont alors été concernés : Forêt, Carrière et Industriel.

4. TESTS ET CALCULS REALISES

- **Modèle LMER**

Les indices de biodiversité calculés seront analysés à l'aide d'un **modèle LMER** sous R pour permettre de voir de quelle manière ils (effets fixes) sont influencés par le milieu d'origine et la date du parc (variation aléatoire).

Pour commencer, la **loi de Poisson** va être mobilisée, ce qui est possible avec les données de type comptage ("outcome" entier positif). Les modèles linéaires ou les régressions logistiques ne sont pas adaptées dans ce cas-là. C'est pour ces raisons que les modèles/régressions de Poisson (GLM, modèle linéaire généralisé avec une fonction de lien logarithmique et une distribution statique suivant la loi de Poisson) vont être utilisés.

Hypothèse : la variance est égale à la moyenne. Si cela n'est pas le cas, un problème de **surdispersion** est rencontré (utiliser la loi quasi-Poisson). Pour savoir si les données rencontrent ce cas-là, il est possible de faire plusieurs tests directement sous R. Pour vérifier si la distribution observée est semblable à la distribution de Poisson, une fonction est utilisée. Elle permet de visualiser si la distribution observée prend la même forme que la théorique (Annexe 10).

Quand il n'y a pas de surdispersion, il faut calculer les modèles de Poisson avec la fonction glm en indiquant la famille Poisson (Annexe 11).

- Outcome : S, Shannon, Simpson et Piélou
- Variables catégorielles : milieu originel (forêt, carrière et industriel), quadrat (sous-panneau et bordure) et année (de 2016, 2017, 2019 et 2021)

- **ANOVA et Kruskal-Wallis**

L'**ANOVA** a pour but de tester si les **différences observées entre les groupes sont significatives** (Annexe 12). Cela revient à rejeter l'hypothèse nulle, qui postule l'absence de différence entre les groupes, pour accepter l'hypothèse alternative suggérant que ces différences sont réelles. Cette méthode compare la variance entre les groupes à celle observée au sein de chaque groupe.

- Variables indépendantes/explicatives : milieu + date et milieu + quadrat
- Variables dépendantes/expliquées : richesse spécifique et les différents indices
- Hypothèses à valider : normalité des résidus et homogénéité des variances
- Hypothèse nulle : les moyennes des groupes sont égales
- Hypothèse alternative : il existe une différence dans les moyennes

Les calculs sont réalisés sur R.

Shapiro (Annexe 13) : Ce test cherche à savoir s'il existe une **normalité des résidus**. Si la probabilité (p-value) observée est inférieure au niveau de risque choisi (risque α) donc à 0,05, alors l'hypothèse nulle H_0 est rejetée. L'échantillon ne provient pas d'une distribution normale. Pour accepter la normalité des résidus et pour réaliser une ANOVA, une p-value supérieure à 0.05 est donc nécessaire.

Bartlett (Annexe 14) : Il permet de déterminer si les **variances entre plusieurs groupes sont égales ou non**. Si la p-value est inférieure à 0,05 (α), l'hypothèse nulle H_0 est rejetée. La variance n'est pas égale entre chaque groupe et donc que tous les groupes n'ont pas la même variance. Pour accepter l'homogénéité des variances et donc pour réaliser une ANOVA, une p-value supérieure à 0.05 est nécessaire.

Tuckey (Annexe 15) : Il s'agit d'un **test post-hoc pour comparer chaque couple** de variables explicatives et donc mieux cerner les différences de l'ANOVA.

Si les hypothèses ne sont pas validées, il est possible de faire un test de **Kruskal-Wallis** (Annexe 16), sans pourtant pouvoir tester l'interaction des facteurs (variables explicatives). Ce test permet de déterminer si au moins deux groupes présentent des différences significatives. Cependant, comme l'ANOVA, il ne précise pas quels groupes diffèrent entre eux. Pour cela, un test post-hoc est nécessaire. Le **test de Dunn** (Annexe 17) constitue une méthode non paramétrique adaptée aux comparaisons multiples par paire, en calculant la p-value de chaque paire. La p-value obtenue peut être ajustée en utilisant la correction de **Bonferroni**, qui est l'une des méthodes les plus simples pour traiter le problème des comparaisons multiples. Cette correction consiste à multiplier la p-value calculée par le nombre de groupes comparés.

Si la p-value ajustée est inférieure au seuil de signification, α , ici fixé à 0,05, l'hypothèse nulle H_0 , selon laquelle il n'existe aucune différence entre les groupes, est rejetée. Par conséquent, une p-value inférieure à 0,05 indique une différence significative entre les deux groupes concernés.

- PERMANOVA

La **PERMANOVA** (Permutation-based Multivariate Analysis of Variance), réalisée sur R (Annexe 18), est une méthode non paramétrique utilisée pour **tester l'existence de différences significatives entre des groupes** de données multivariées, basées sur une matrice de dissimilarité (dans cette étude avec Bray-Curtis). Contrairement à une ANOVA traditionnelle, la PERMANOVA ne nécessite pas que les données soient normalement distribuées ni homogènes en termes de variance.

- Hypothèse nulle (H0) : Il n'y a pas de différence entre les groupes définis par le facteur étudié.
- Hypothèse alternative (H1) : Il existe une différence significative entre les groupes en termes de distances/dissimilarités.

H0 est rejeté quand la p-value est inférieure à 0,05.

- MDS et NMDS

La **matrice multivariée** (Multidimensional Scaling, MDS) est une méthode statistique utilisée pour transformer une matrice de proximité (similarités ou dissimilarités) entre N objets en un ensemble de coordonnées dans un espace à faible dimension (généralement 2 ou 3 dimensions), afin de permettre une visualisation facile des relations entre ces objets. Le MDS métrique cherche à maintenir autant que possible les distances réelles observées dans la matrice de dissimilarité. Les dissimilarités entre les objets sont supposées continues et exactes, c'est-à-dire qu'elles reflètent une information quantitative précise. Dans le cas du **NMDS**, seul l'ordonnement des dissimilarités compte. Autrement dit, ce n'est pas la valeur précise des distances qui importe, mais leur rang (relation d'ordre), cela permet de produire une représentation où les relations ordinales entre les distances (du plus petit au plus grand) sont préservées.

La MDS est réalisée sur ExcelStat et la NMDS sur R (Annexe 19).

- ACP

L'**Analyse en Composantes Principales** (ACP) est une méthode statistique de réduction de dimension utilisée pour **explorer et visualiser des ensembles de données** complexes en conservant un maximum de l'information initiale. Chaque composante principale est associée à une proportion de la variance totale. Les deux ou trois premières composantes expliquent généralement l'essentiel de l'information. Le cercle des corrélations représente une projection des variables initiales dans un plan formé par les deux premières composantes principales. Lorsque deux variables sont éloignées du centre du graphique :

- Si elles sont proches l'une de l'autre, elles sont fortement et positivement corrélées ($r \approx 1$).
- Si elles sont perpendiculaires, elles ne sont pas corrélées ($r \approx 0$).
- Si elles sont opposées de manière symétrique par rapport au centre, elles sont fortement et négativement corrélées ($r \approx -1$).

Si les variables sont proches du centre, leur contribution est faible, rendant toute interprétation incertaine. Dans ce cas, il faut examiner la matrice de corrélations ou analyser d'autres plans factoriels (NMDS) pour approfondir les résultats. Dans cette étude, l'ACP a été réalisée sur ExcelStat.

- Moyenne pondérée

Cela permet de **donner un poids plus important aux espèces les plus présentes** dans un milieu. Cela permet également, par effet inverse, de minimiser les espèces présentes en faible abondance. Les moyennes pondérées sont calculées sur Excel avec le calcul “=SOMMEPROD (plage des valeurs, plage des poids) / SOMME (plage des poids)”.

RESULTATS

INDICES DE BIODIVERSITE ET ESPECES EXOTIQUES

Tableau 3 : Moyennes des indices des quadrats par milieu

Milieu	S	Shannon	Piélou	Simpson
C	8,19	1,51	0,79	0,69
F	6,03	1,01	0,58	0,48
I	8,60	1,33	0,63	0,61

Tableau 2 : Moyennes des indices des quadrats par dates

Date	S	Shannon	Piélou	Simpson
2016	6,25	1,10	0,61	0,51
2017	5,45	0,94	0,60	0,48
2019	8,12	1,25	0,61	0,57
2021	6,70	1,14	0,63	0,52

RICHESSSE SPECIFIQUE

Modèle LMER

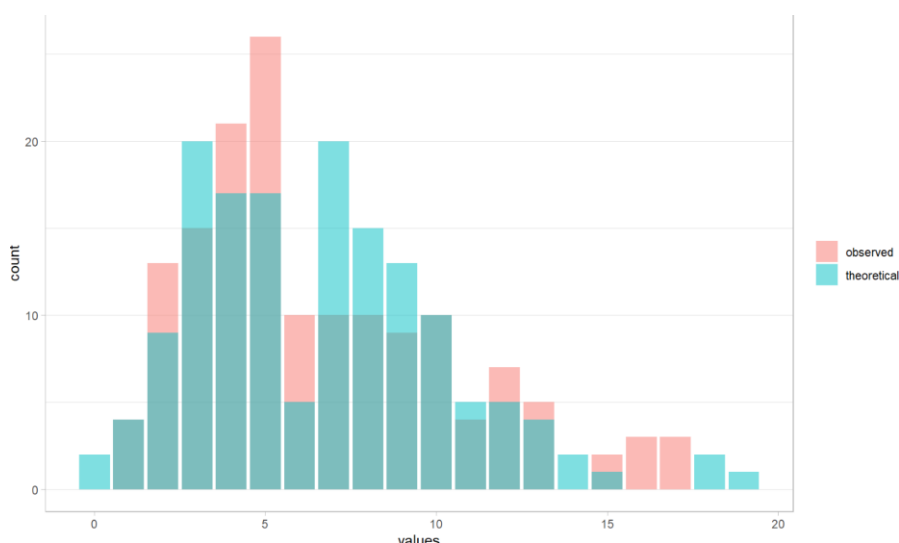


Figure 4 : Evaluation de la surdispersion - S

Aucune surdispersion détectée.

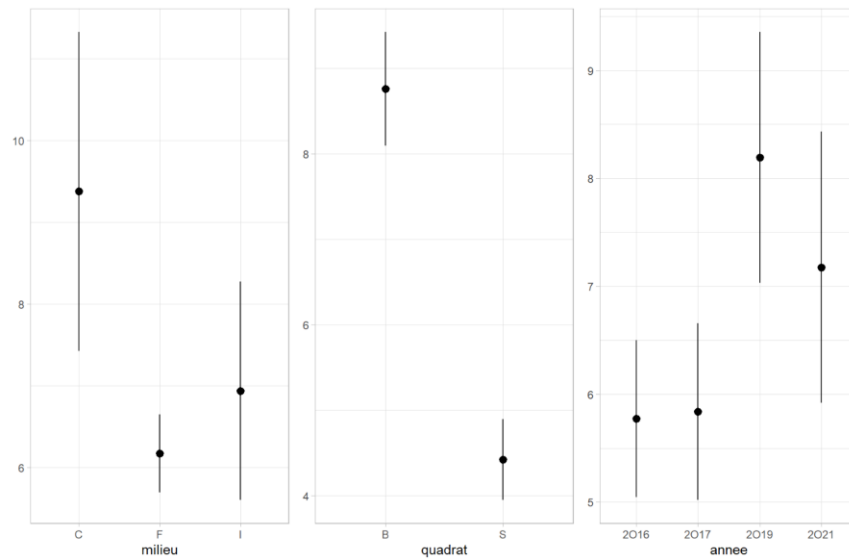


Figure 5 : Prédictions marginales moyennes - S

ANOVA

Test : Richesse spécifique ~ Milieu et Date

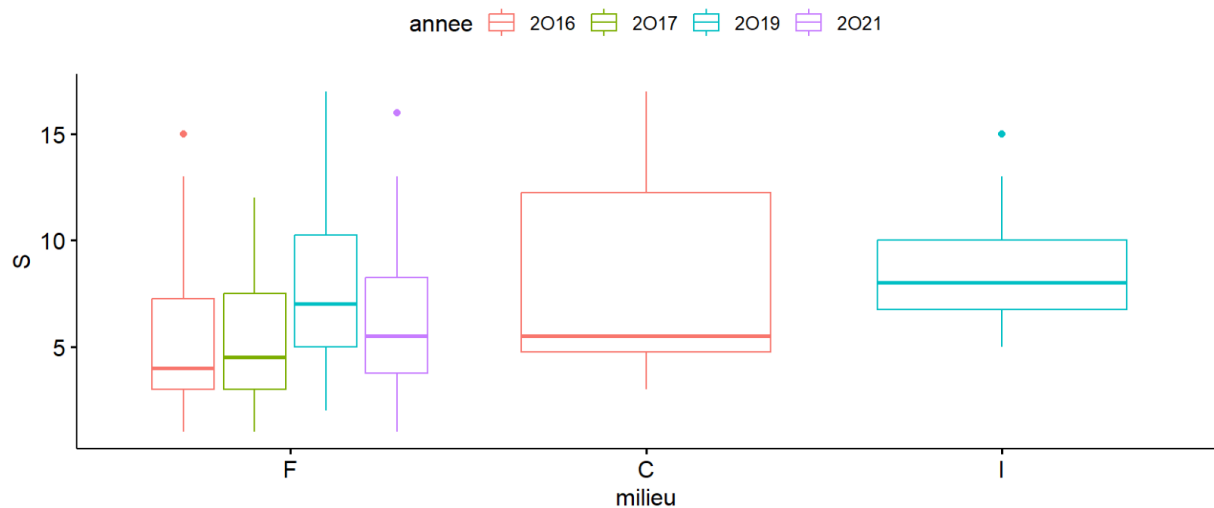
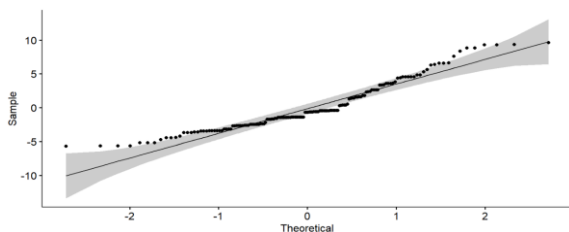


Figure 6 : Boxplots de la richesse floristique selon le milieu et l'année



p-value Shapiro < 0,05

L'hypothèse nulle est rejetée, les données ne sont donc pas normalement distribuées. Il n'est pas possible de continuer l'ANOVA. Le test de Kruskal-Wallis va être réalisé.

Figure 7 : Normalité des résidus - S

Kruskal-Wallis

Test : Richesse Spécifique ~ Milieu

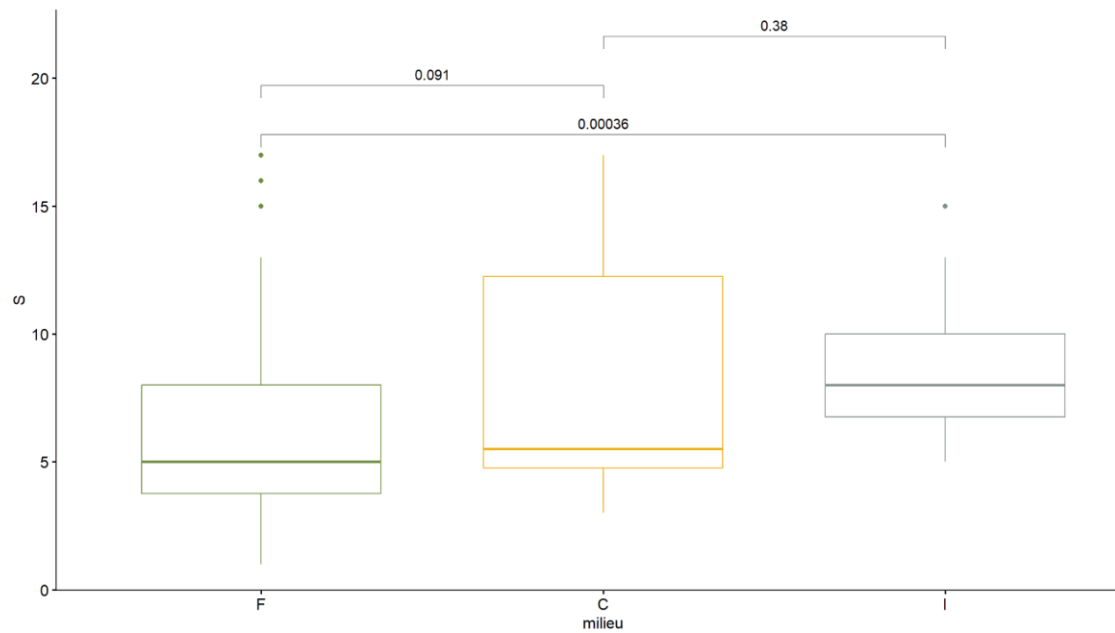


Figure 8 : Richesse spécifique par milieu avec tests de significativité (p-values)

Test : Richesse Spécifique ~ Date

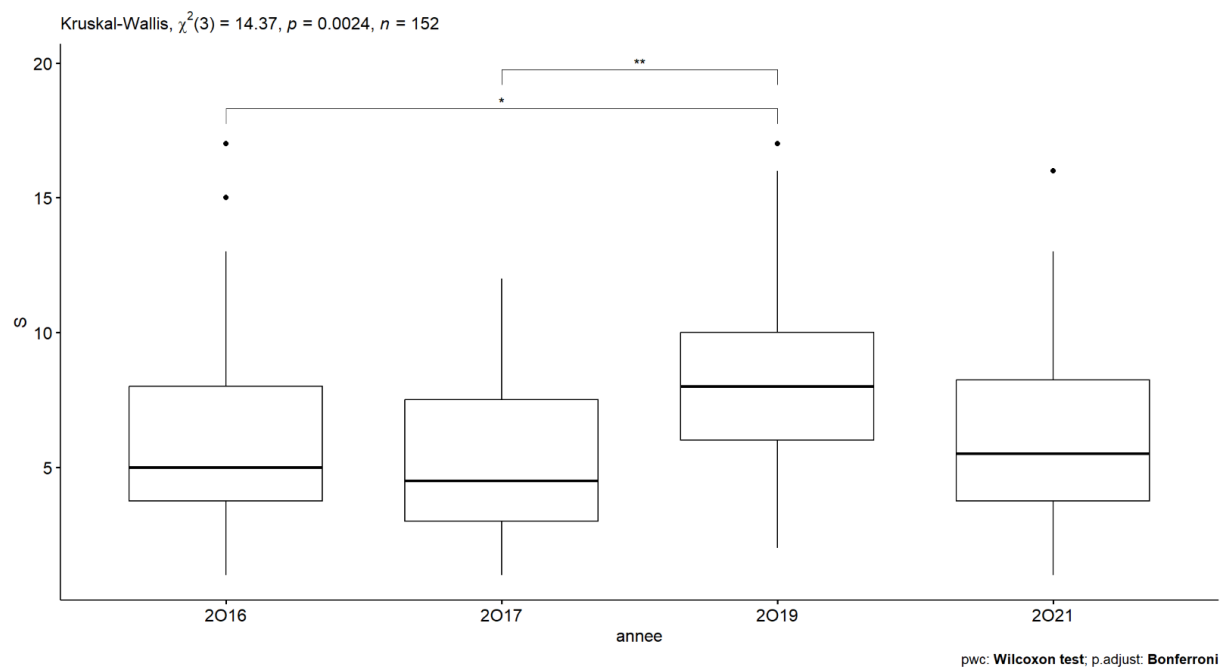


Figure 9 : Richesse spécifique par date avec tests de significativité (p-values)

Modèle LMER

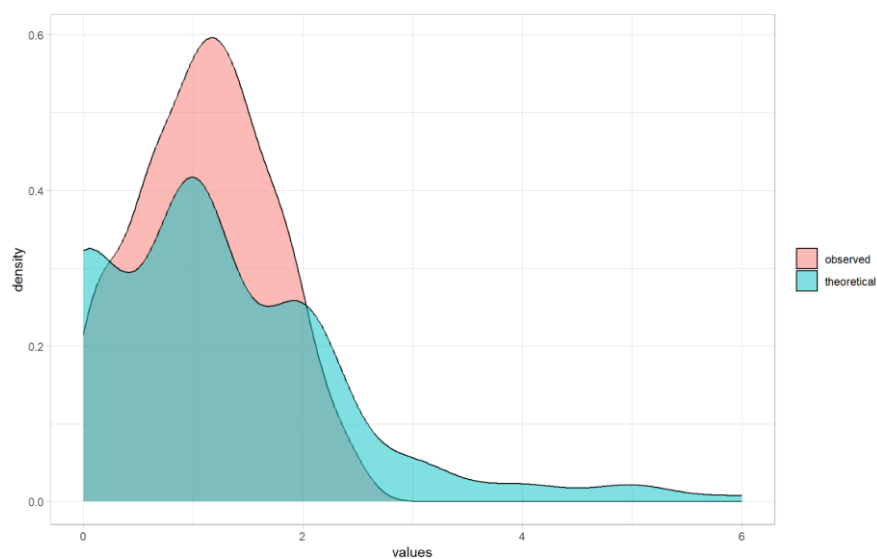


Figure 10 : Evaluation de la surdispersion - Shannon

Aucune surdispersion détectée.

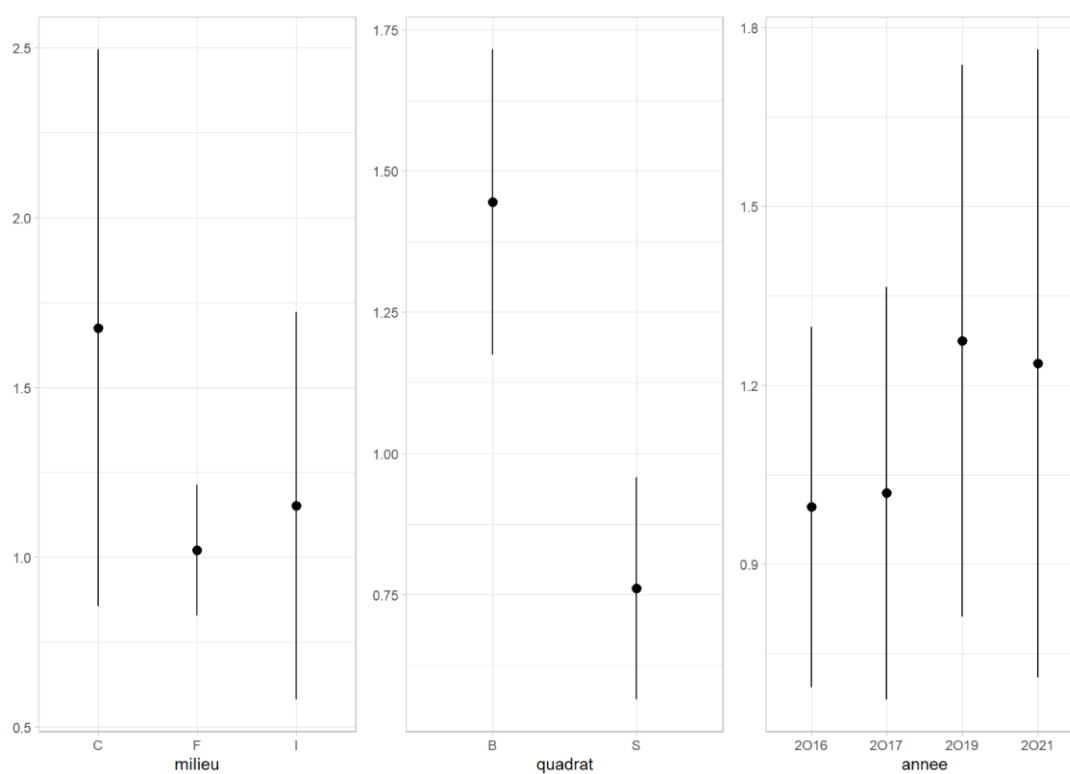


Figure 11 : Prédictions marginales moyennes - Shannon

ANOVA

Test : Shannon ~ Milieu et Date

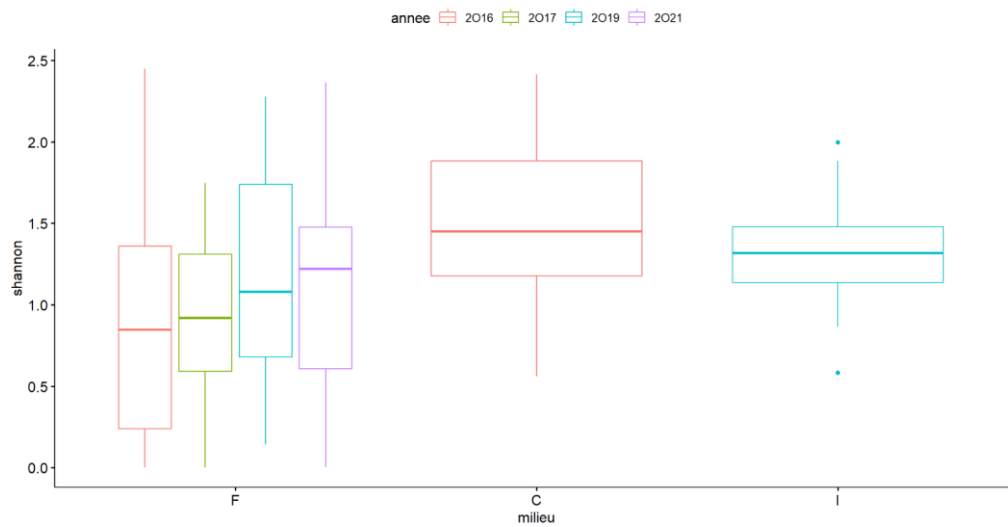
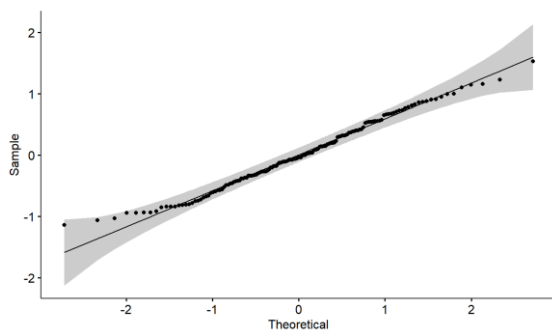


Figure 12 : Boxplots de Shannon selon le milieu et l'année



p-value Shapiro > 0,05

L'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée, les données sont normalement distribuées. Il est possible de continuer l'ANOVA avec comme données expliquées les indices de Shannon.

Figure 13 : Normalité des résidus - Shannon

La p-value du test de Bartlett est de 0,012, inférieure à 0,05. L'hypothèse nulle est rejetée, les variances des échantillons ne sont pas identiques, il y a donc une hétérogénéité des variances. Il n'est pas possible de continuer l'ANOVA. Le test de Kruskal-Wallis va être fait.

Kruskal-Wallis

Test : Shannon ~ Milieu

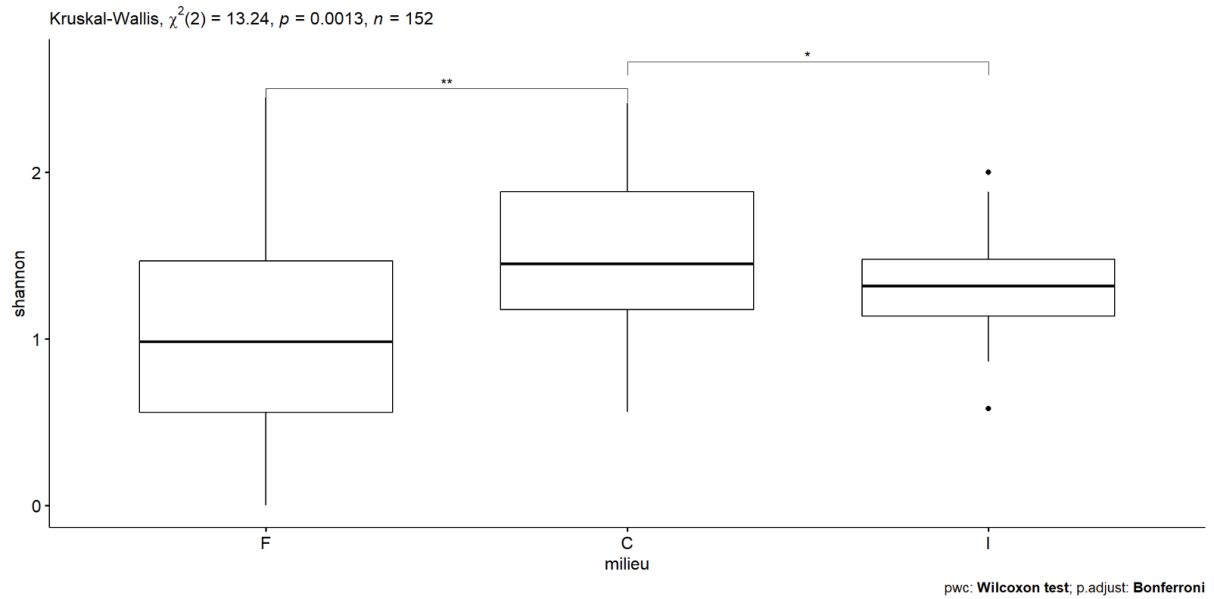


Figure 14 : Shannon par milieu avec tests de significativité (p-values)

Test : Shannon ~ Date

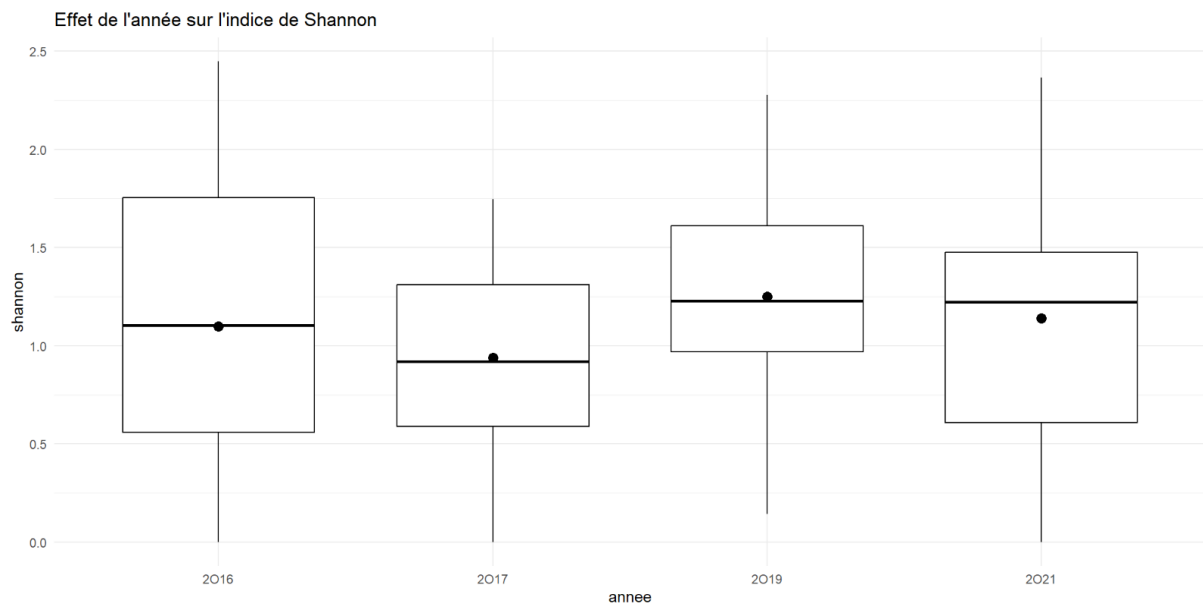


Figure 15 : Shannon par date avec tests de significativité (p-values)

La p-value de Kruskal est supérieure à 0,05, H_0 ne peut pas être rejetée, il n'existe pas de différence significative entre les années.

INDICE DE SIMPSON

Modèle LMER

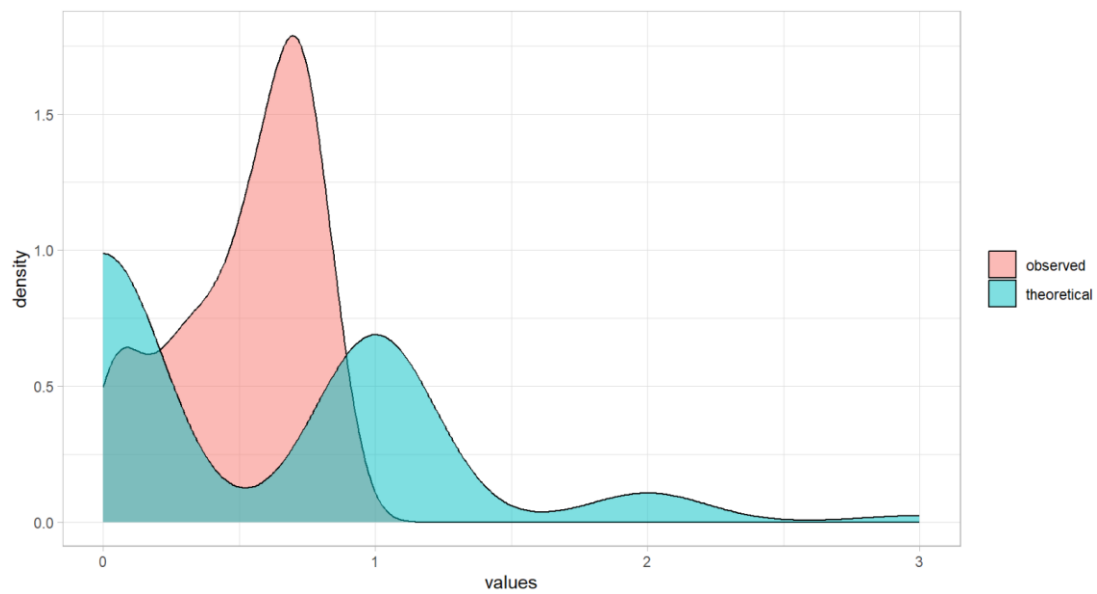


Figure 16 : Evaluation de la surdispersion - Simpson

Aucune surdispersion détectée.

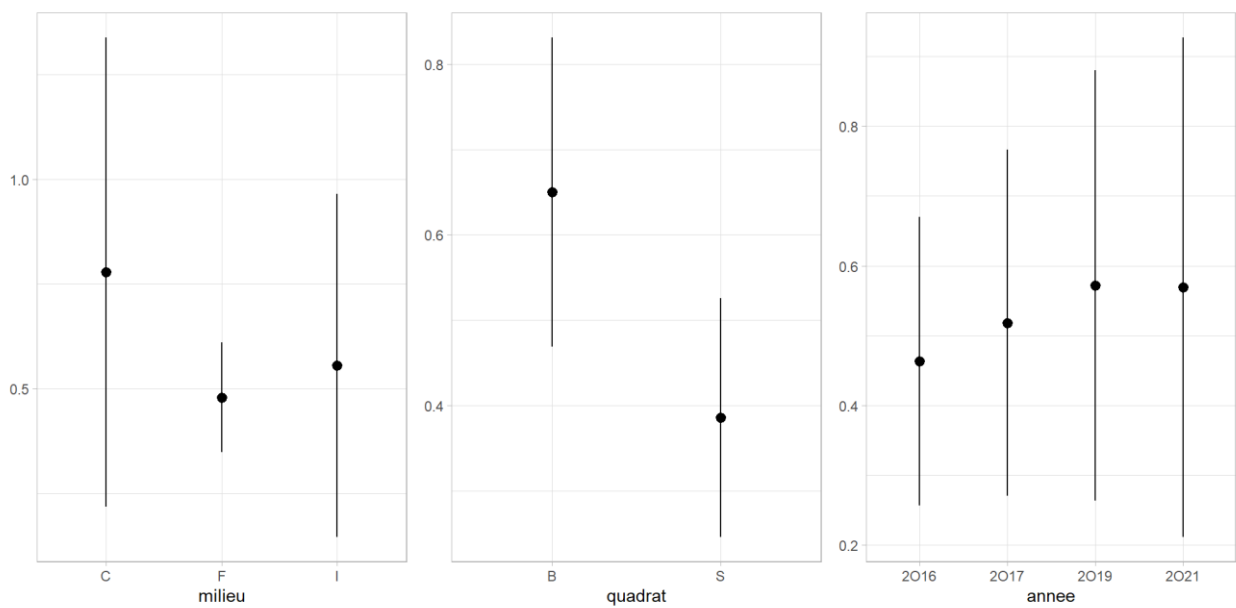


Figure 17 : Prédictions marginales moyennes - Simpson

ANOVA

Test : Simpson ~ Milieu et Date

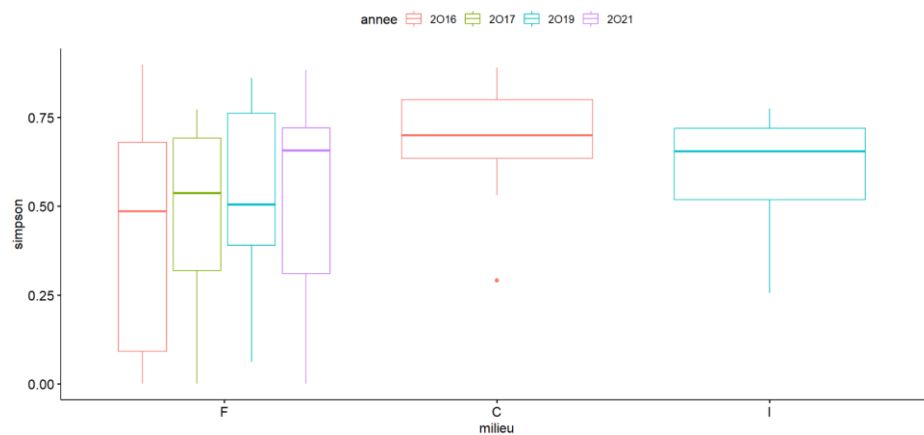
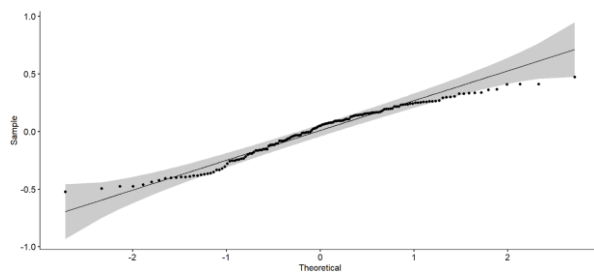


Figure 18 : Boxplots de Simpson selon le milieu et l'année



p-value Shapiro < 0,05

L'hypothèse nulle est rejetée, les données ne sont donc pas normalement distribuées. Il n'est pas possible de continuer l'ANOVA. Le test de Kruskal-Wallis va être réalisé.

Figure 19 : Normalité des résidus - Simpson

Kruskal-Wallis

Test : Simpson ~ Milieu

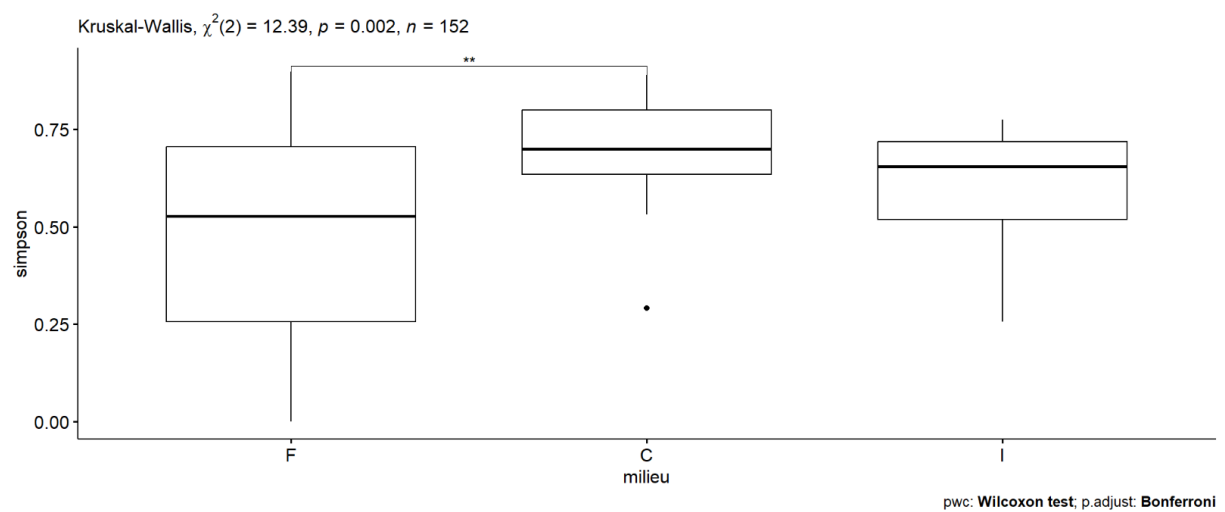


Figure 20 : Simpson par milieu avec tests de significativité (p-values)

Test : Simpson ~ Date

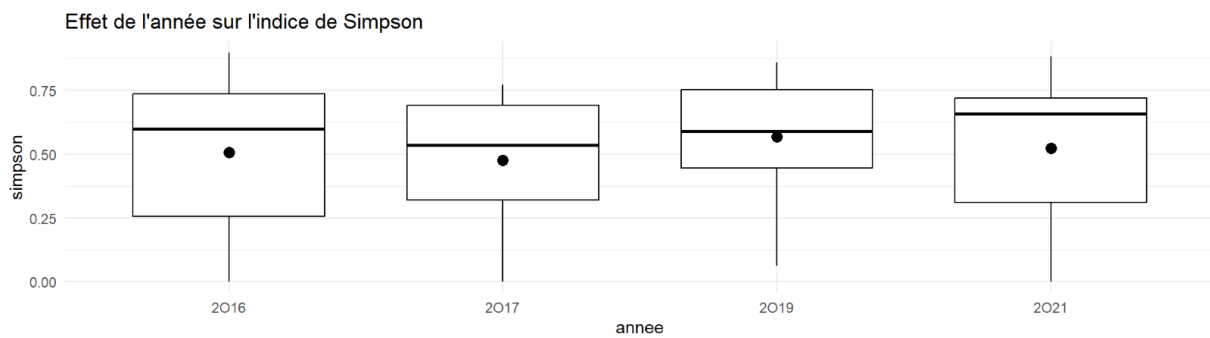


Figure 21 : Simpson par date avec tests de significativité (p-values)

La p-value de Kruskal est supérieure à 0,05, H0 ne peut pas être rejetée, il n'existe pas de différence significative entre les années.

INDICE DE PIELOU

Modèle LMER

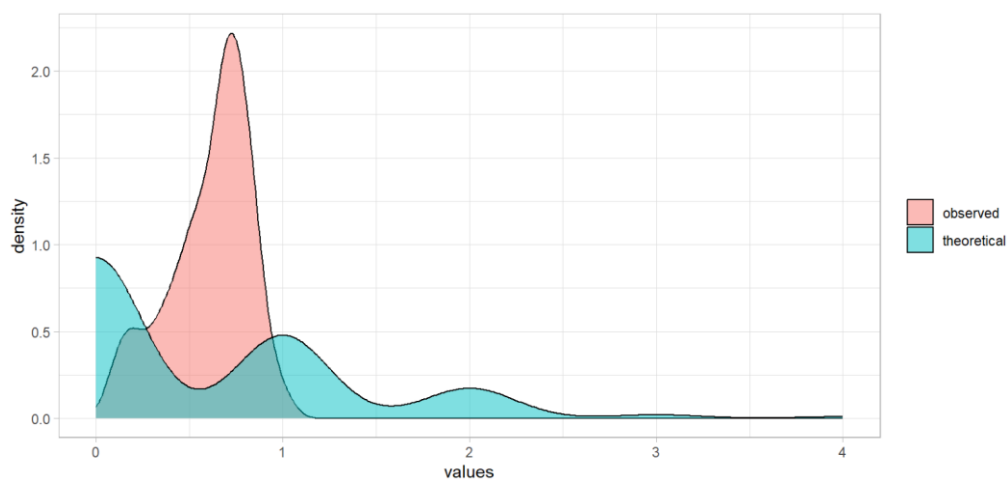


Figure 22 : Evaluation de la surdispersion - Pielou

Aucune surdispersion détectée.

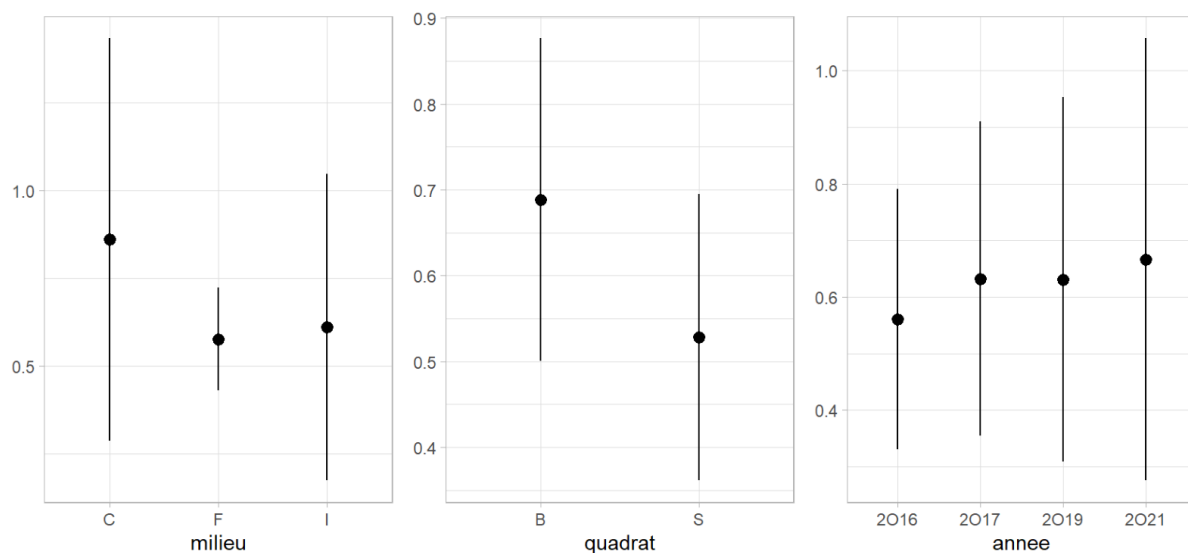


Figure 23 : Prédictions marginales moyennes - Piélou

ANOVA

Test : Piélou ~ Milieu et Date

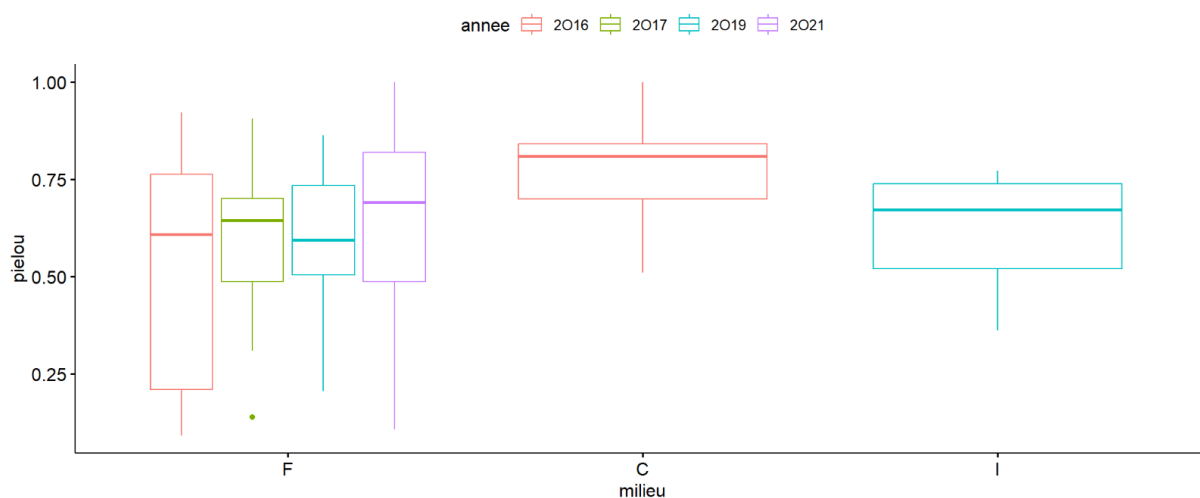
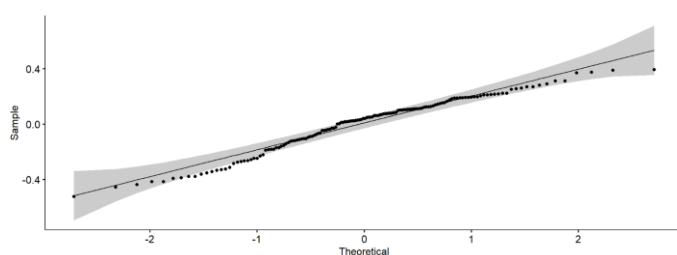


Figure 24 : Boxplots de Piélou selon le milieu et l'année



p-value Shapiro < 0,05

L'hypothèse nulle est rejetée, les données ne sont donc pas normalement distribuées. Il n'est pas possible de continuer l'ANOVA. Le test de Kruskal-Wallis va être réalisé.

Figure 25 : Normalité des résidus - Piélou

Kruskal-Wallis

Test : Piélou ~ Milieu

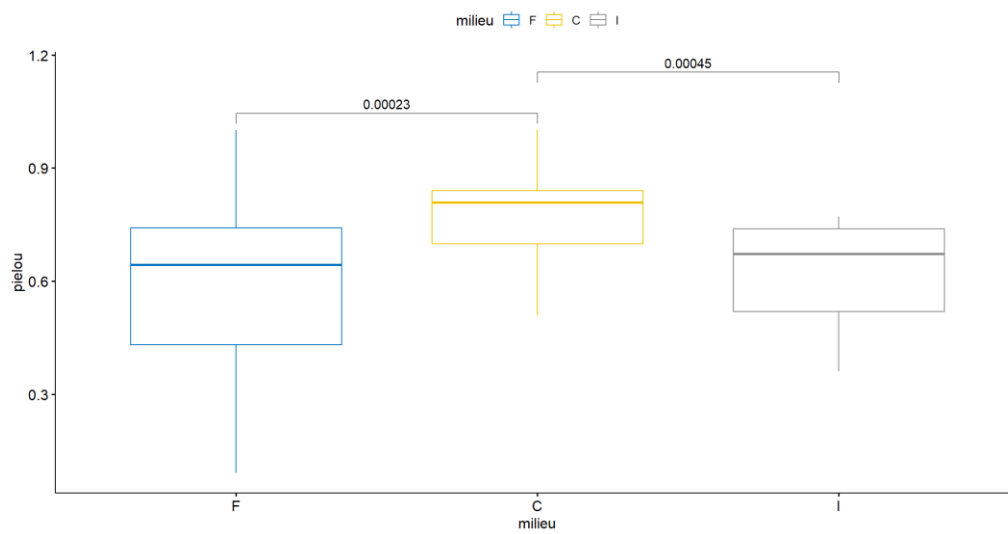


Figure 26 : Piélou par milieu avec tests de significativité (*p-values*)

Test : Piélou ~ Date

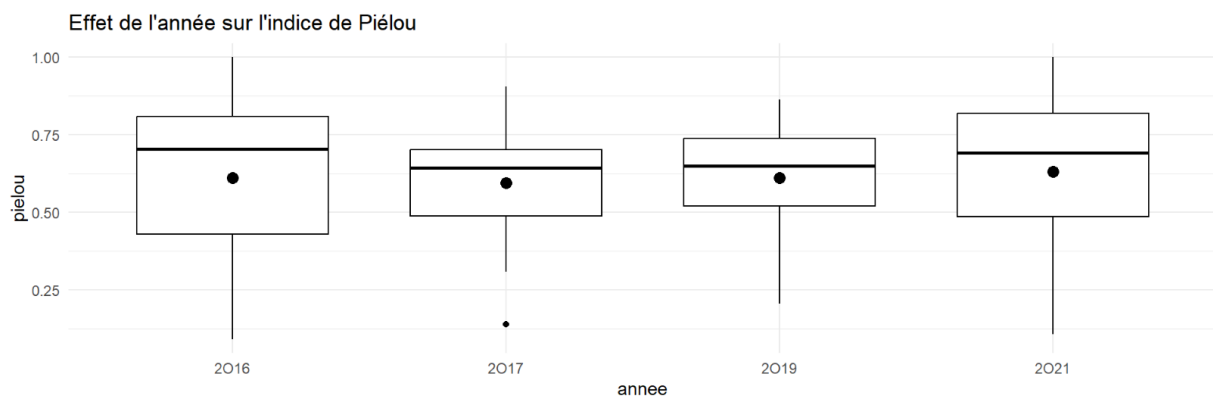


Figure 27 : Piélou par date avec tests de significativité (*p-values*)

La *p-value* de Kruskal est supérieure à 0,05, H_0 ne peut pas être rejetée, il n'existe pas de différence significative entre les années.

ESPECES EXOTIQUES

Tableau 4 : Moyennes d'espèces locales et introduites par parc

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	
MP	0,99	0,94	1,00	1,00	0,78	0,70	0,61	0,86	MP : Moyenne Pondérée
MnP	0,82	0,87	0,96	0,89	0,89	0,58	0,89	0,89	MnP : Moyenne non Pondérée
n N	20	58	51	17	50	30	36	35	N : Espèce native
n I	2	4	1	1	3	8	2	2	I : Espèce introduite
% N	90,91	93,55	98,08	94,44	92,59	78,95	94,74	94,59	n : Nombre
% I	9,09	6,45	1,92	5,56	7,41	21,05	5,26	5,41	% : Pourcentage

Tableau 5 : Ratio de la moyenne par parc d'espèces exotiques dans chaque milieu

Milieu	S	Espèces native	Espèces exotiques	Ratio
C	62	58	4	0,069
F	203	189	16	0,085
I	53	50	4	0,080

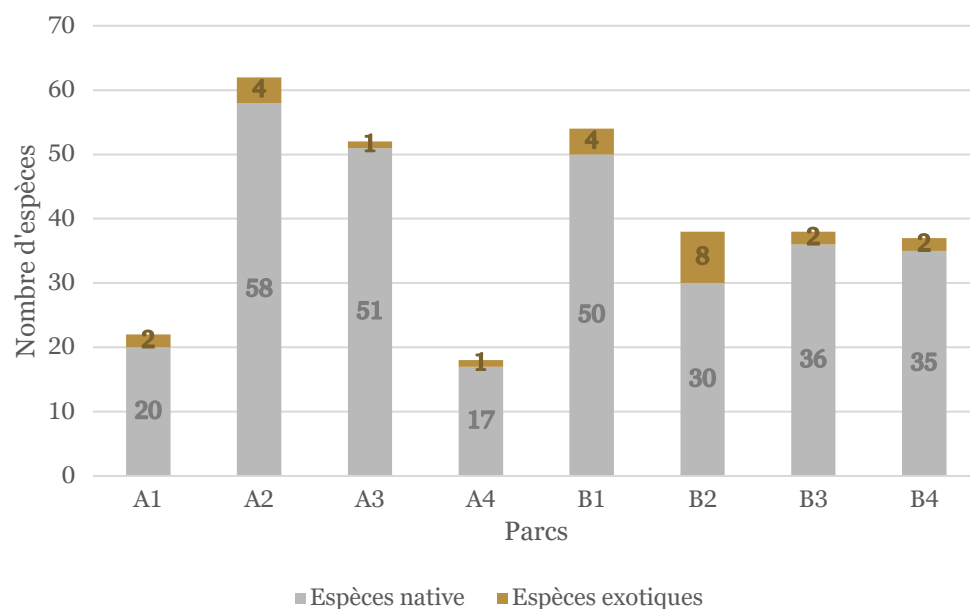


Figure 28 : Nombre d'espèces natives et exotiques par parc

ANOVA

Test : Abondance d'espèces exotiques ~ Milieu et Date

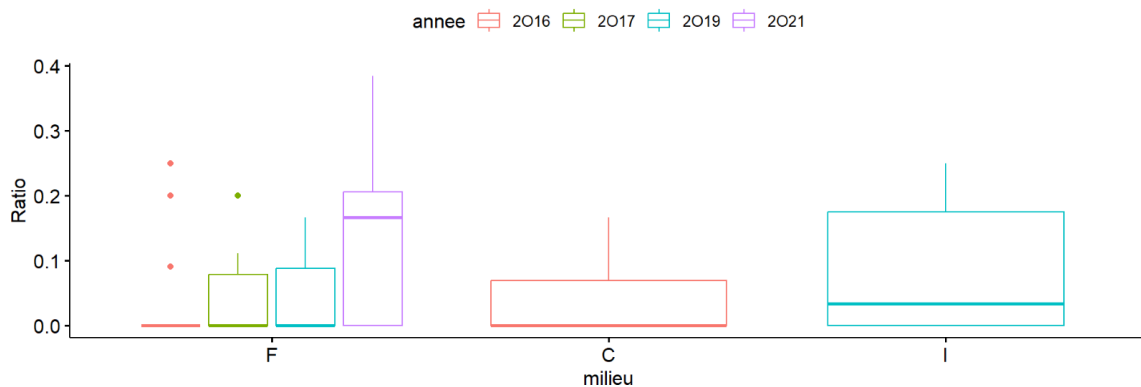


Figure 29 : Boxplots de l'abondance d'espèces exotiques selon le milieu et l'année



Figure 30 : Normalité des résidus - Sp exotiques

p-value Shapiro < 0,05

L'hypothèse nulle est rejetée, les données ne sont donc pas normalement distribuées. Il n'est pas possible de continuer l'ANOVA. Le test de Kruskal-Wallis va être réalisé.

Kruskal-Wallis

Test : Abondance d'espèces exotiques ~ Milieu/quadrat

Les quadrats vont être séparés également en Sous-Panneau et Bordure pour déterminer s'il existe une différence entre ces milieux. En effet, sans distinction, aucune différence n'est prouvée par les tests alors qu'il en existe visiblement.

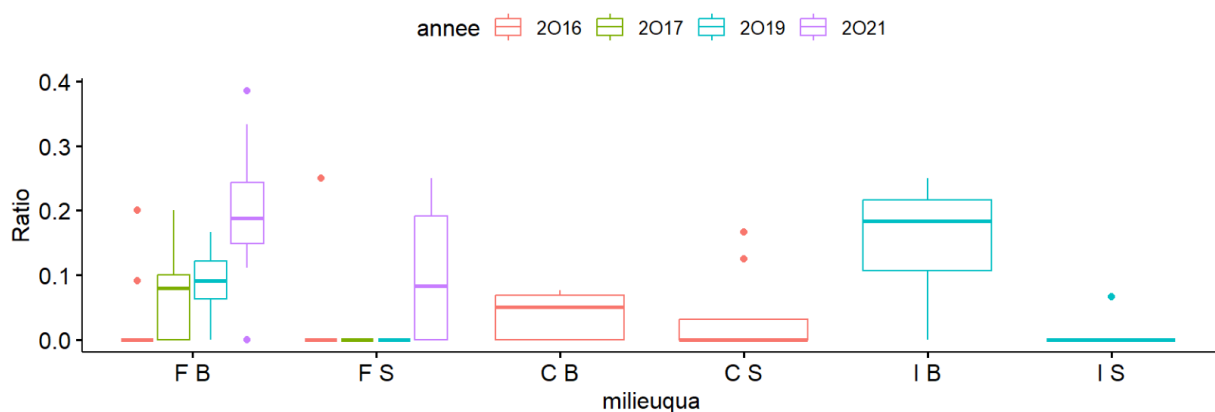


Figure 31 : Boxplots des espèces exotiques selon le milieu/quadrat et l'année

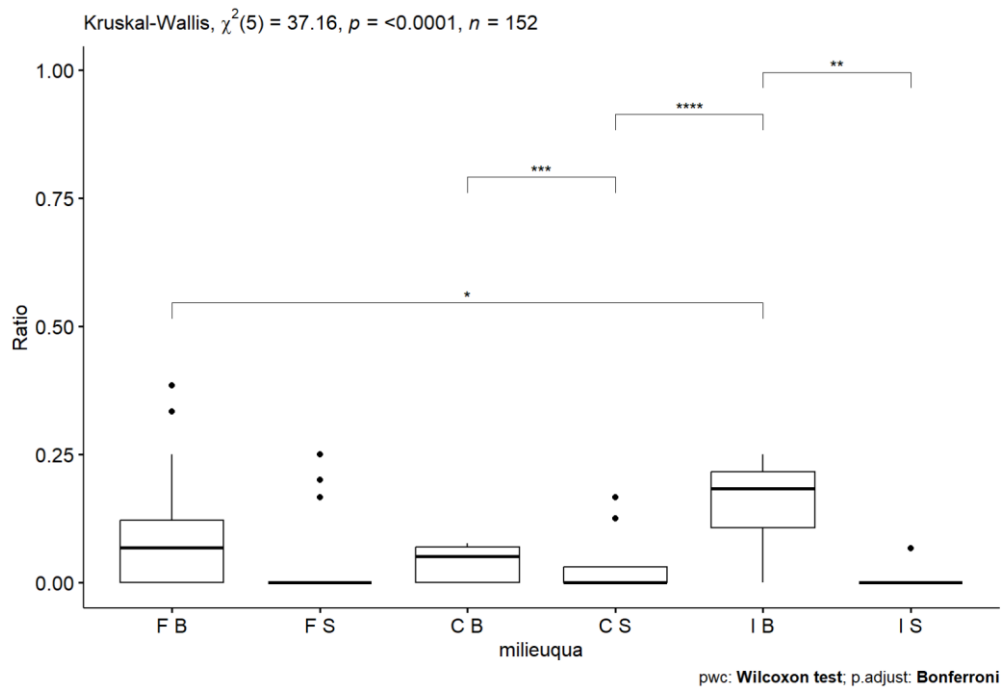


Figure 32 : Espèces exotiques par milieu/quadrat avec tests de significativité (*p-values*)

La seule *p-value* exploitable dans cette étude est celle entre FB et IB car elle compare deux quadrats identiques (Bordure).

Test : Abondance d'espèces exotiques ~ Date

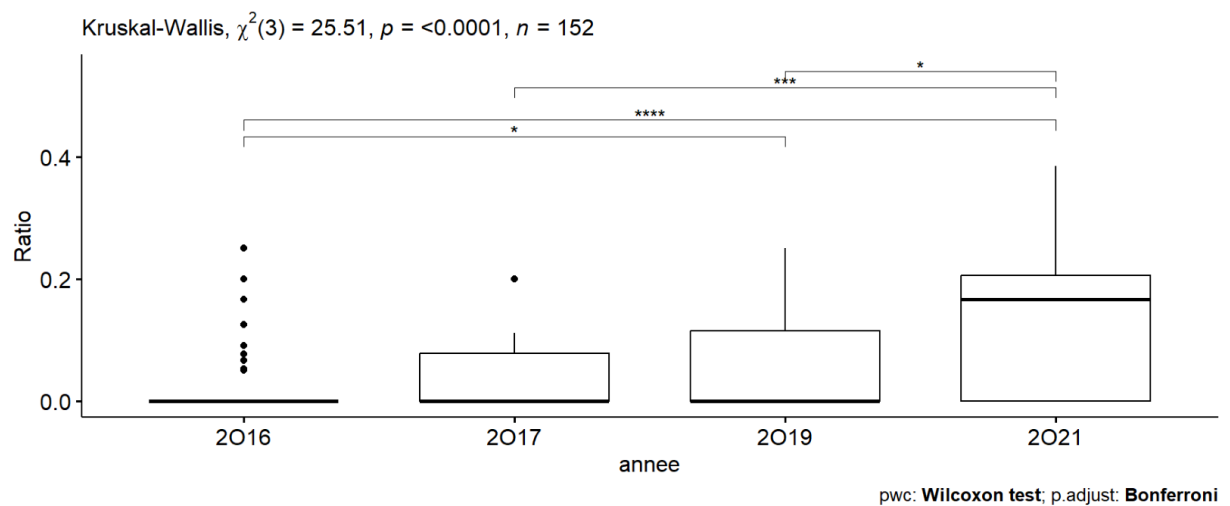


Figure 33 : Espèces exotiques par date avec tests de significativité (*p-values*)

TRAIT FONCTIONNEL

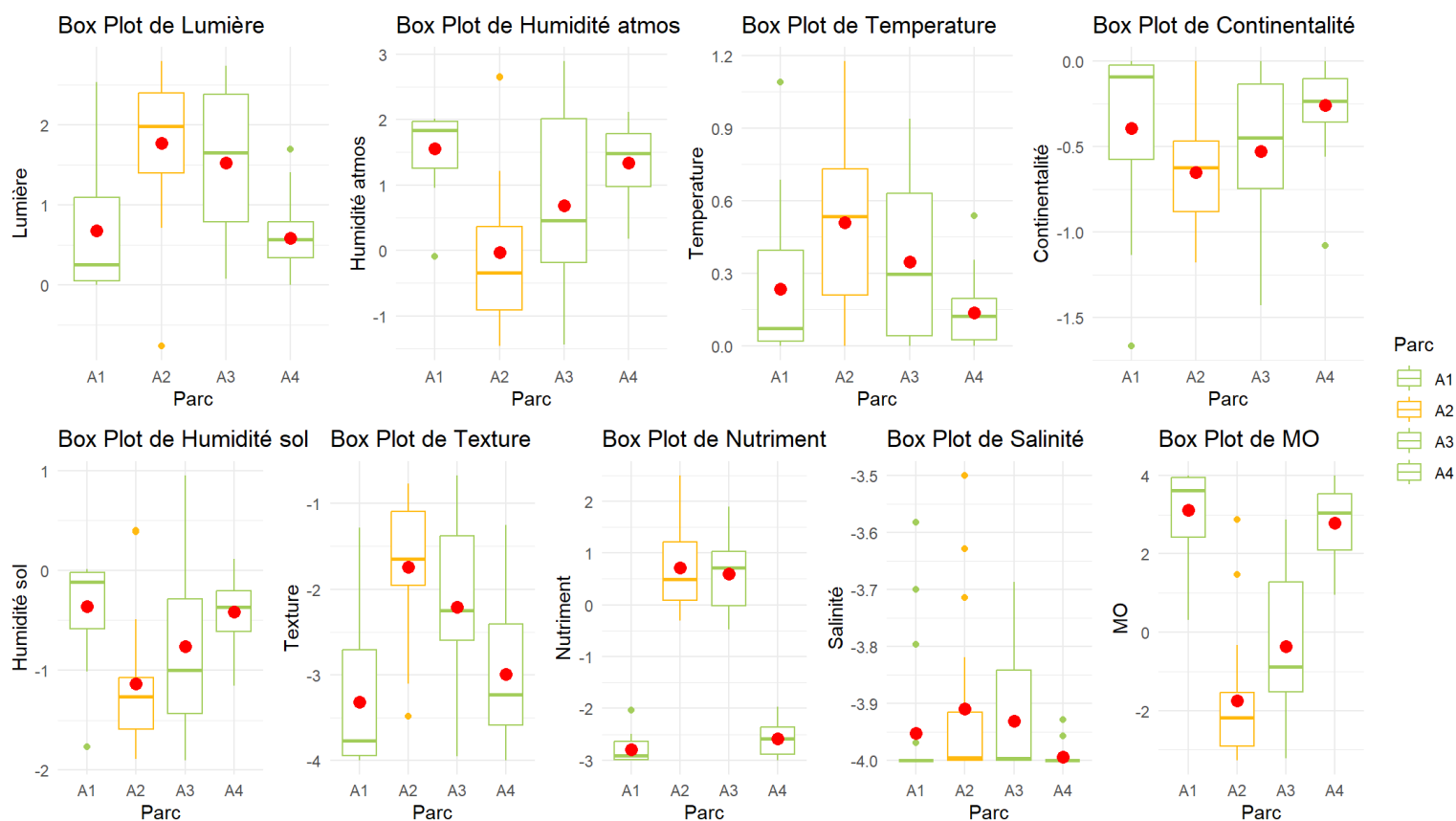


Figure 35 : Boxplots des valeurs d'Ellenberg pour les parcs A

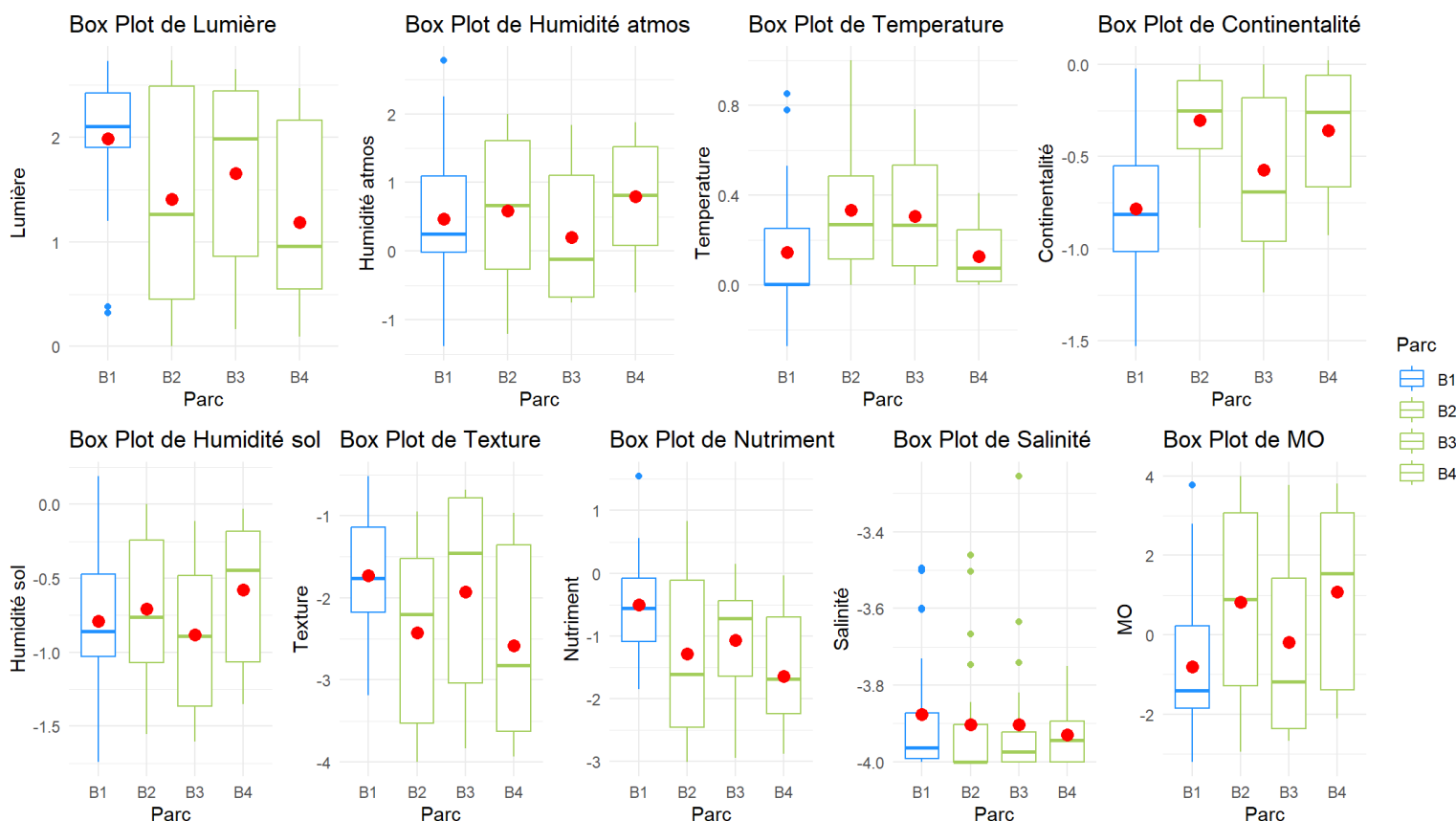


Figure 34 : Boxplots des valeurs d'Ellenberg pour les parcs B (Annexe 20)

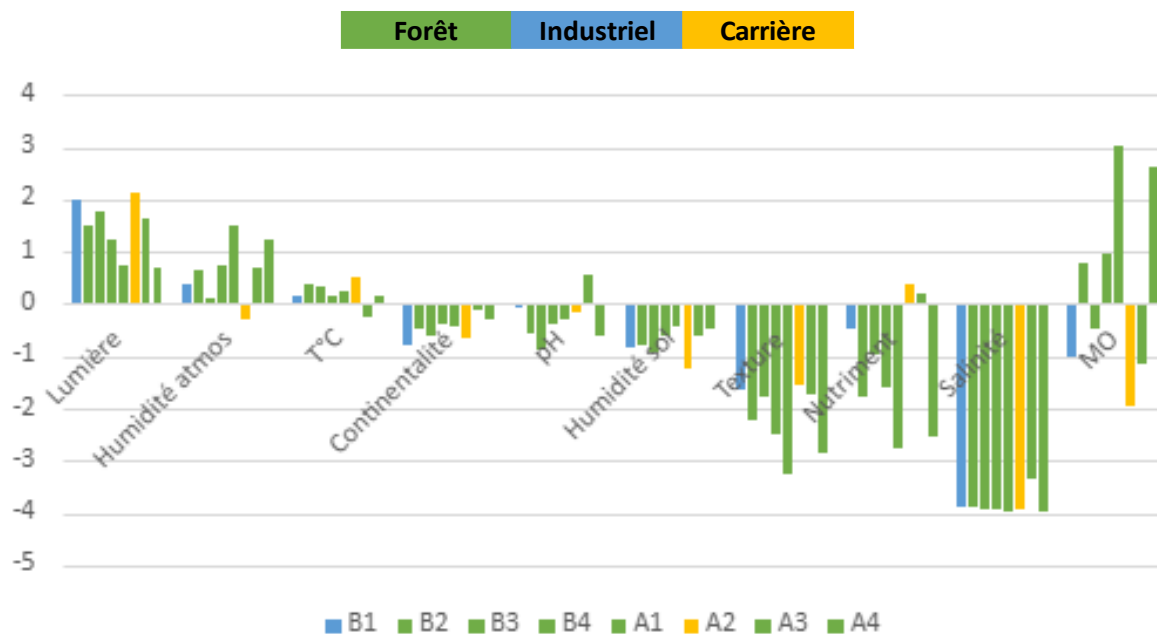


Figure 36 : Moyennes pondérée des valeurs d'Hellenberg

MDS

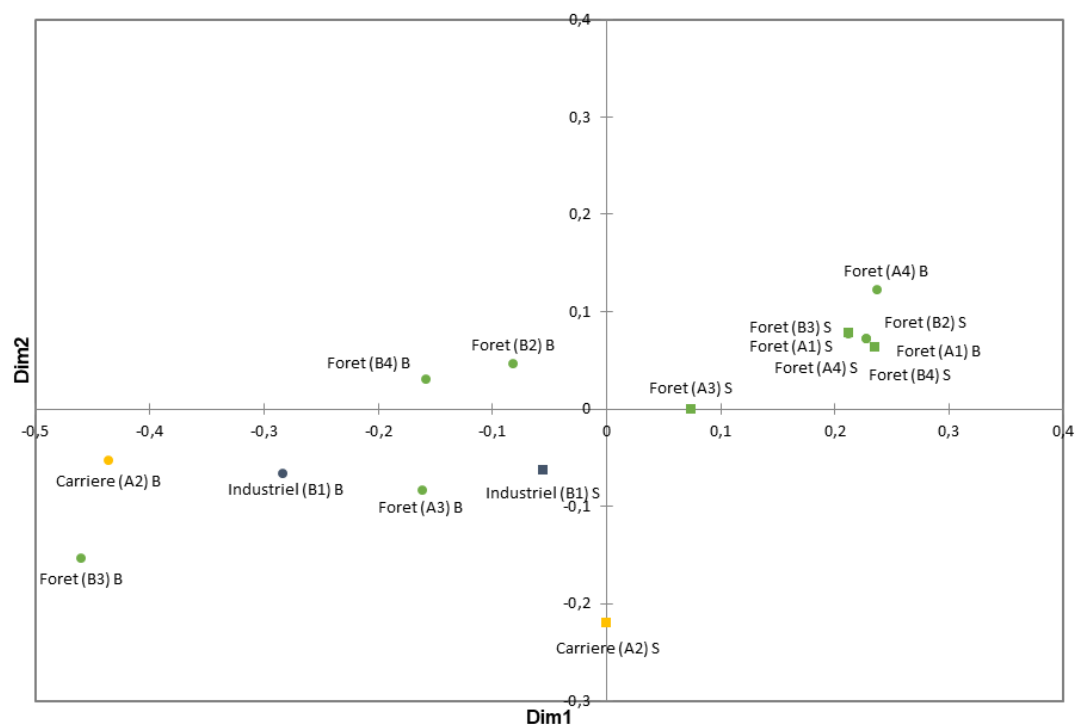


Figure 37 : MDS entre les moyennes des valeurs d'Ellenberg

ACP

Du fait de leur rapprochement sur une première ACP réalisée (Annexe 21 et Annexe 22), des variables ont été supprimées pour éviter la répartition des sites sur un même axe. Les variables Humidité atmosphérique, continentalité, salinité et texture n'ont donc pas été prises en compte dans une seconde ACP, celle qui sera analysée. Le choix de ces variables a été fait selon l'objectif de ce PFE. L'humidité du sol (contre l'humidité atmosphérique et continentalité), le taux de nutriment (contre la salinité) et la lumière (contre la texture) semblent permettre de mieux décrire le type de milieu originel (Annexe 23).

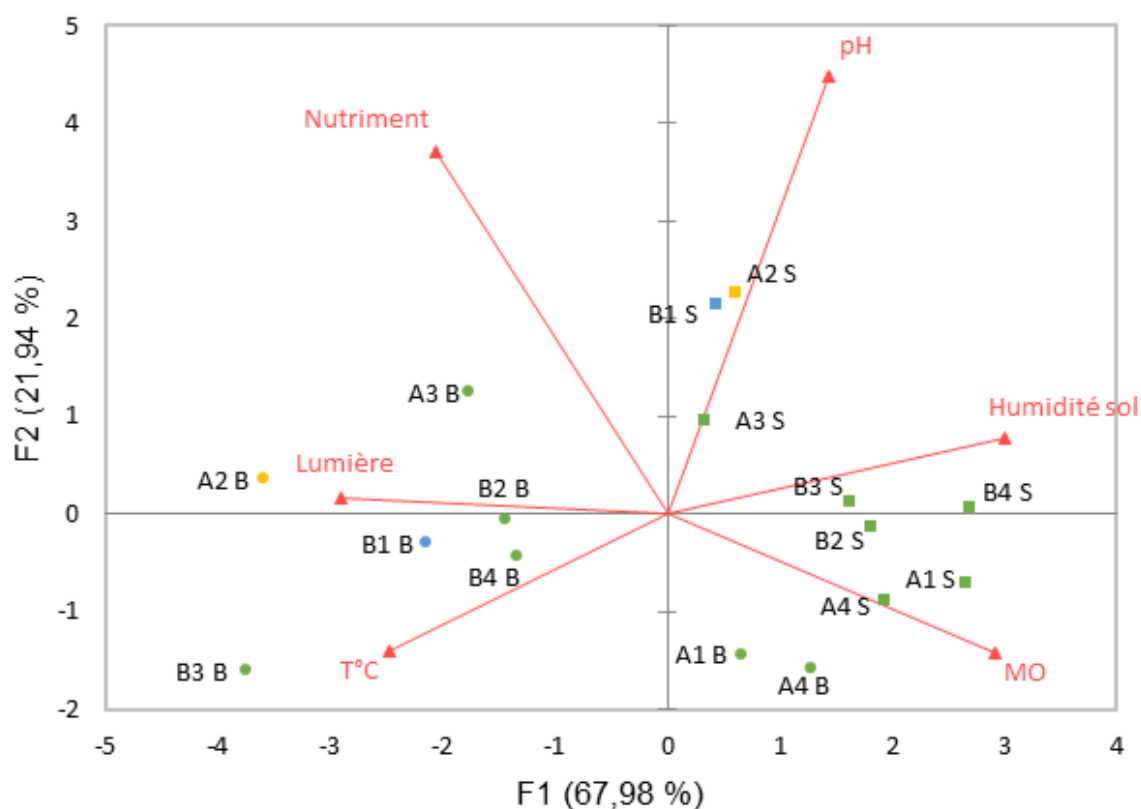


Figure 38 : ACP entre les moyennes des valeurs d'Ellenberg

Légende

Variables	▲ Valeurs d'Ellenberg
Observations	Milieu originel
	Forêt
	Carrière
	Industriel
	Quadrat
	● Bordure
	■ Sous-panneau

ANOVA

Test : Lumière ~ Milieu et Date

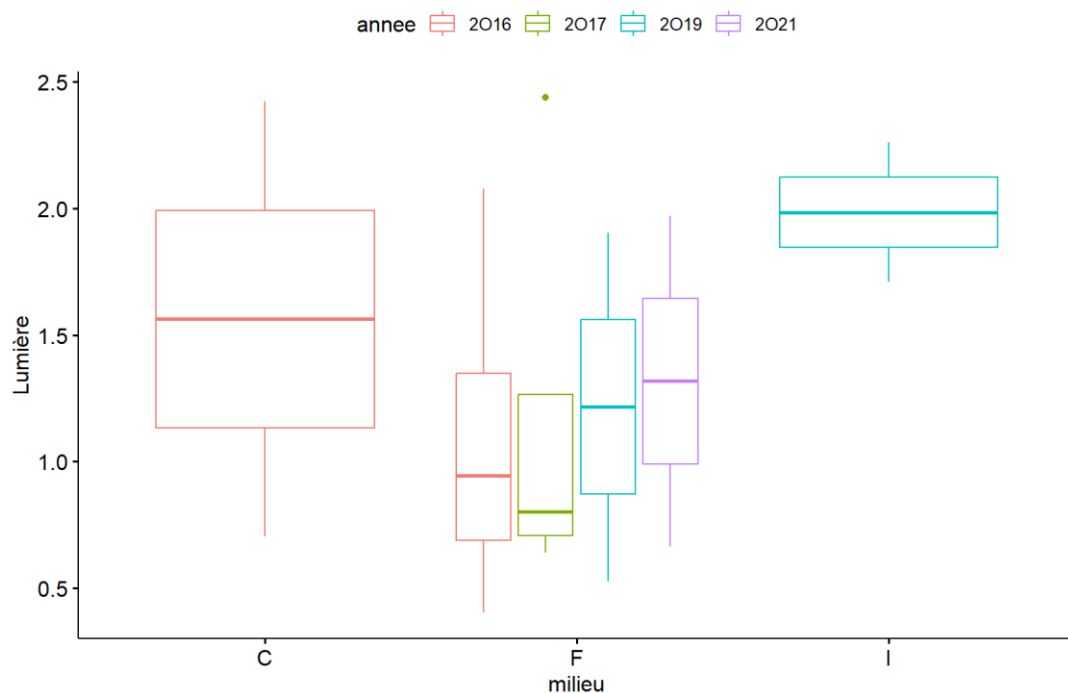
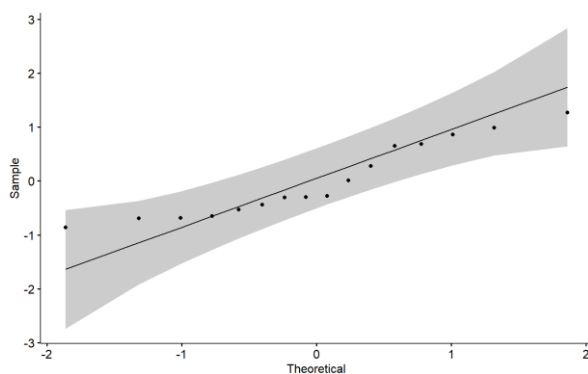


Figure 39 : Boxplots de la valeur Lumière selon le milieu et l'année



p-value Shapiro > 0,05

L'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée, les données sont normalement distribuées. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Figure 40 : Normalité des résidus - Lumière

La p-value du test de Bartlett est de 0,96, supérieure à 0,05. L'hypothèse nulle n'est pas rejetée, les variances des échantillons sont identiques et il y a donc une homogénéité des variances. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Les hypothèses pour réaliser une ANOVA sont respectées. L'ANOVA va être réalisée.

Les p-value qui ressortent de l'ANOVA ne sont pas significatives.

Test : $pH \sim \text{Milieu et Date}$

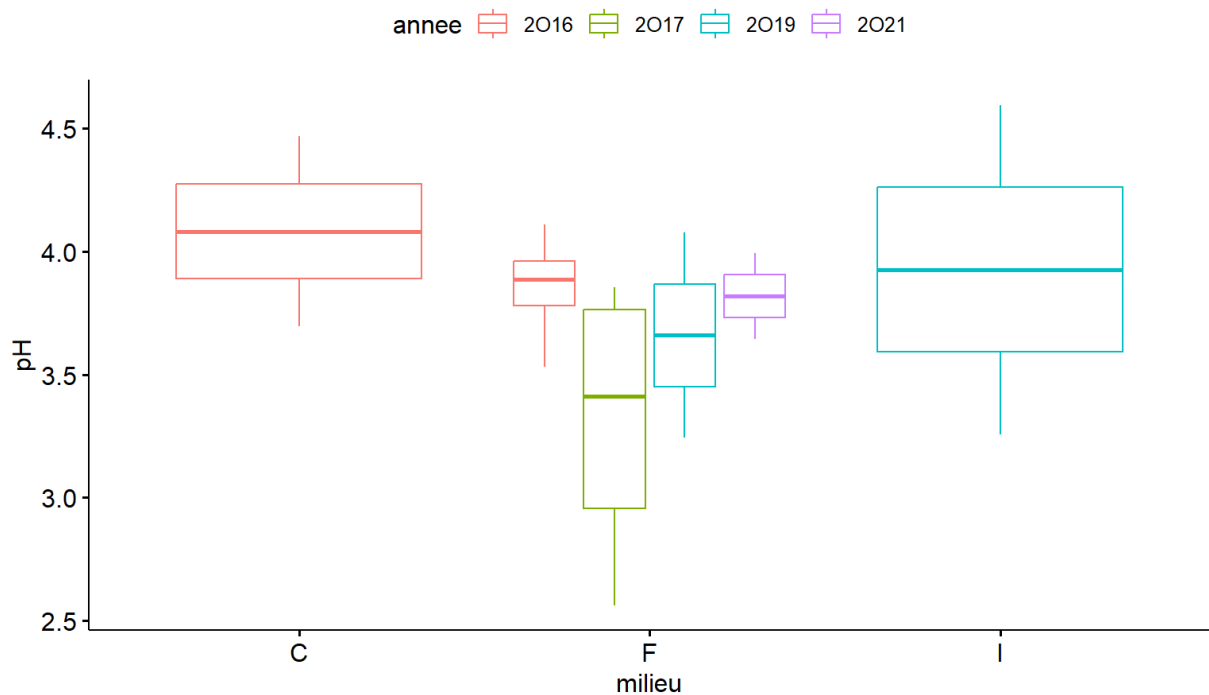
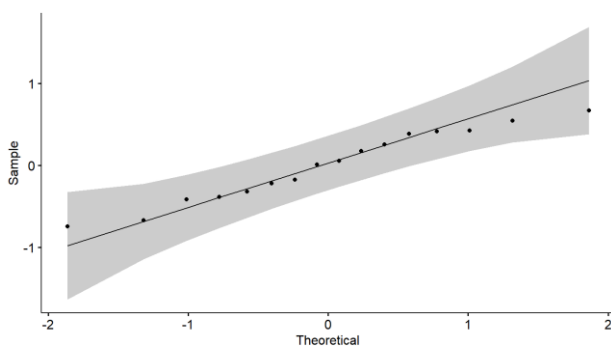


Figure 41 : Boxplots de la valeur pH selon le milieu et l'année



p-value Shapiro > 0,05

L'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée, les données sont normalement distribuées. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Figure 42 : Normalité des résidus - pH

La p-value du test de Bartlett est de 0,65, supérieure à 0,05. L'hypothèse nulle n'est pas rejetée, les variances des échantillons sont identiques et il y a donc une homogénéité des variances. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Les hypothèses pour réaliser une ANOVA sont respectées. L'ANOVA va être réalisée.

Les p-value qui ressortent de l'ANOVA ne sont pas significatives.

Test : Nutriment ~ Milieu et Date

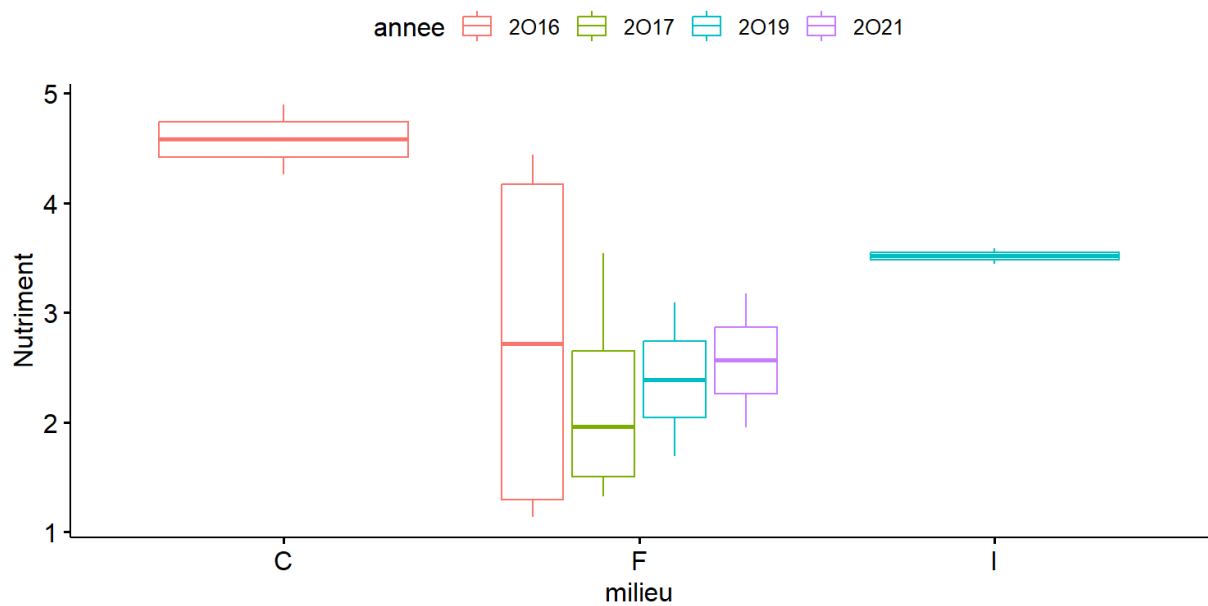
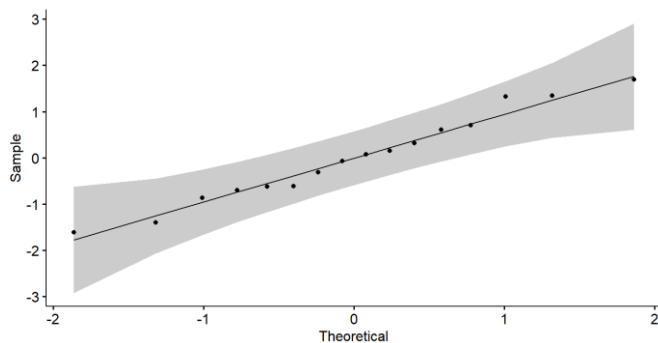


Figure 43 : Boxplots de la valeur Nutriment selon le milieu et l'année



p-value Shapiro > 0,05

L'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée, les données sont normalement distribuées. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Figure 44 : Normalité des résidus - pH

La p-value du test de Bartlett est de 0,41, supérieure à 0,05. L'hypothèse nulle n'est pas rejetée, les variances des échantillons sont identiques et il y a donc une homogénéité des variances. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Les hypothèses pour réaliser une ANOVA sont respectées. L'ANOVA va être réalisée.

Les p-value qui ressortent de l'ANOVA ne sont pas significatives.

Test : Humidité du sol ~ Milieu et Date

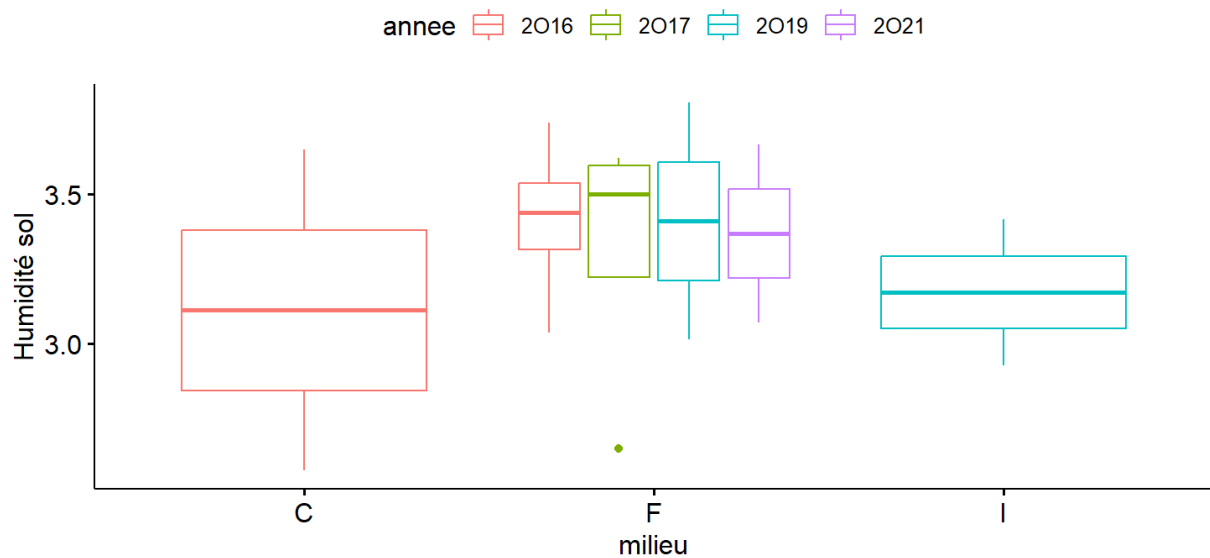


Figure 45 : Boxplots de la valeur Humidité du sol selon le milieu et l'année

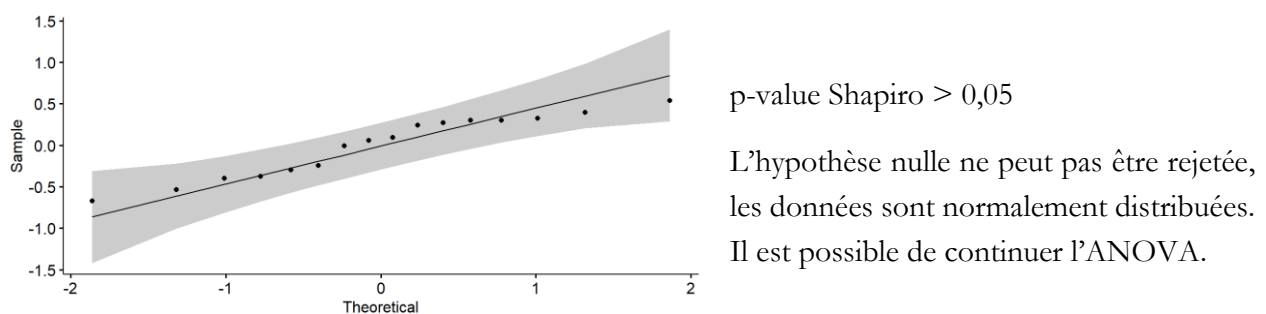


Figure 46 : Normalité des résidus - Humidité sol

La p-value du test de Bartlett est de 0,92, supérieure à 0,05. L'hypothèse nulle n'est pas rejetée, les variances des échantillons sont identiques et il y a donc une homogénéité des variances. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Les hypothèses pour réaliser une ANOVA sont respectées. L'ANOVA va être réalisée.

Les p-value qui ressortent de l'ANOVA ne sont pas significatives.

Test : Température ~ Milieu et Date

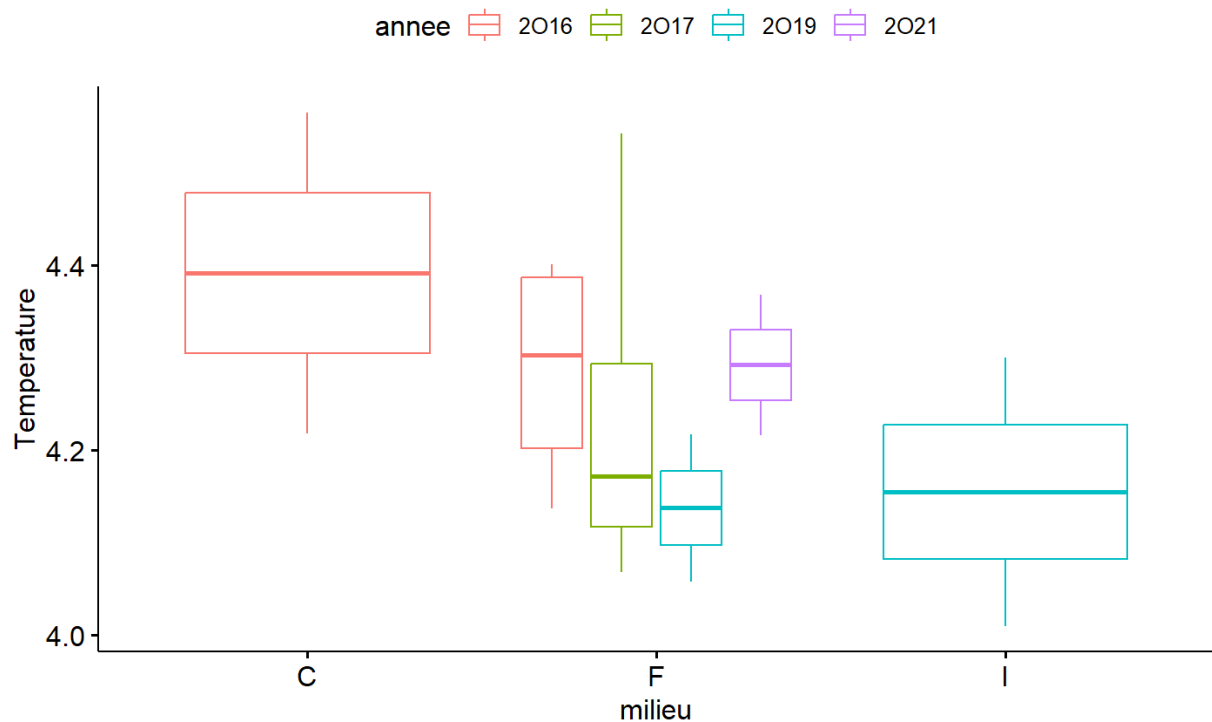
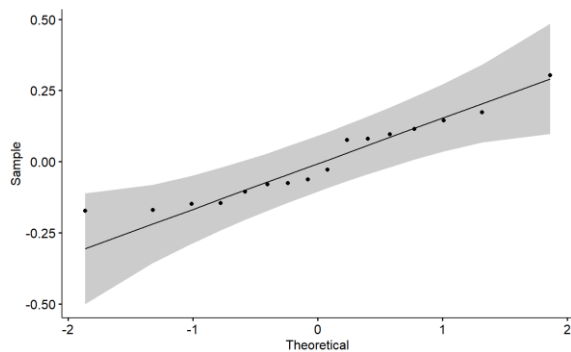


Figure 47 : Boxplots de la valeur Température selon le milieu et l'année



p-value Shapiro > 0,05

L'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée, les données sont normalement distribuées. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Figure 48 : Normalité des résidus - Température

La p-value du test de Bartlett est de 0,93, supérieure à 0,05. L'hypothèse nulle n'est pas rejetée, les variances des échantillons sont identiques et il y a donc une homogénéité des variances. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Les hypothèses pour réaliser une ANOVA sont respectées. L'ANOVA va être réalisée.

Les p-value qui ressortent de l'ANOVA ne sont pas significatives.

Test : Matière Organique ~ Milieu et Date

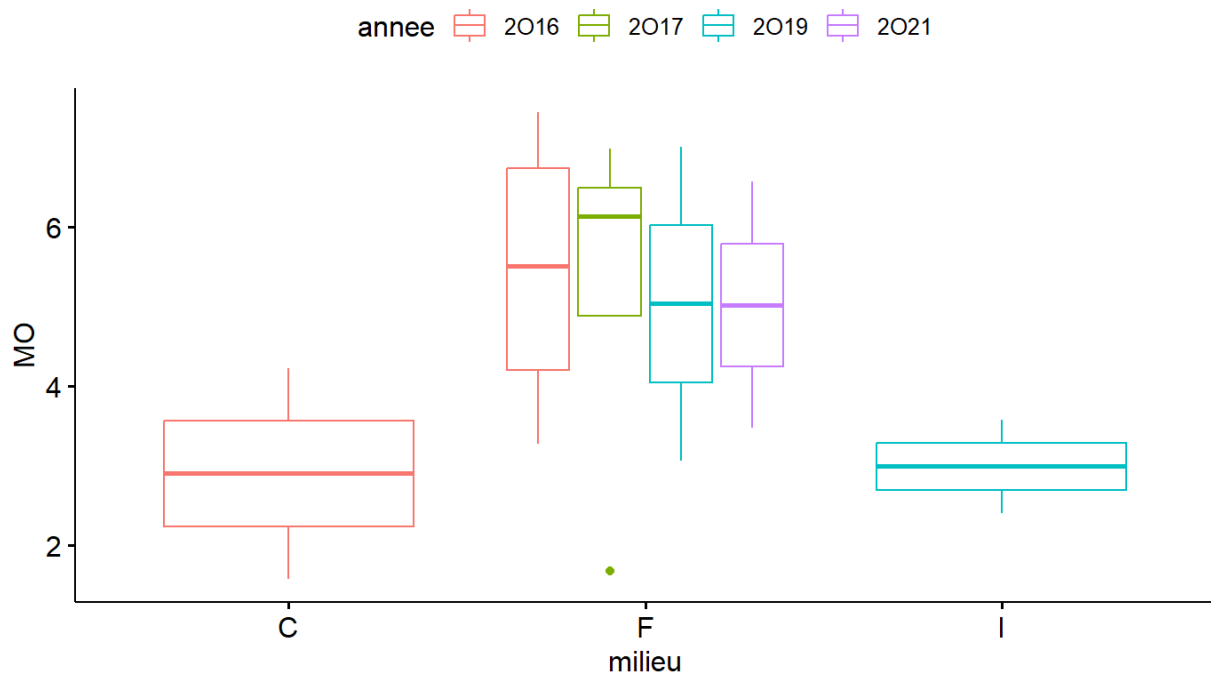
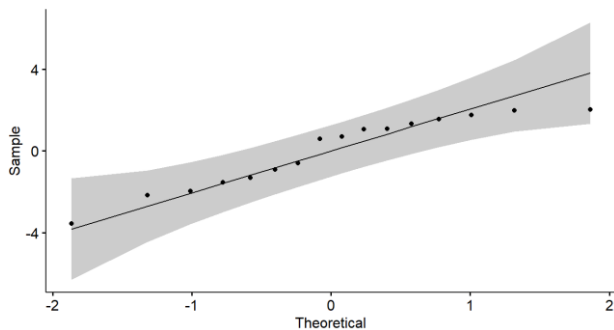


Figure 49 : Boxplots de la valeur Matière Organique selon le milieu et l'année



p-value Shapiro > 0,05

L'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée, les données sont normalement distribuées. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Figure 50 : Normalité des résidus - MO

La p-value du test de Bartlett est de 0,96, supérieure à 0,05. L'hypothèse nulle n'est pas rejetée, les variances des échantillons sont identiques et il y a donc une homogénéité des variances. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Les hypothèses pour réaliser une ANOVA sont respectées. L'ANOVA va être réalisée.

Les p-value qui ressortent de l'ANOVA ne sont pas significatives.

NMDS

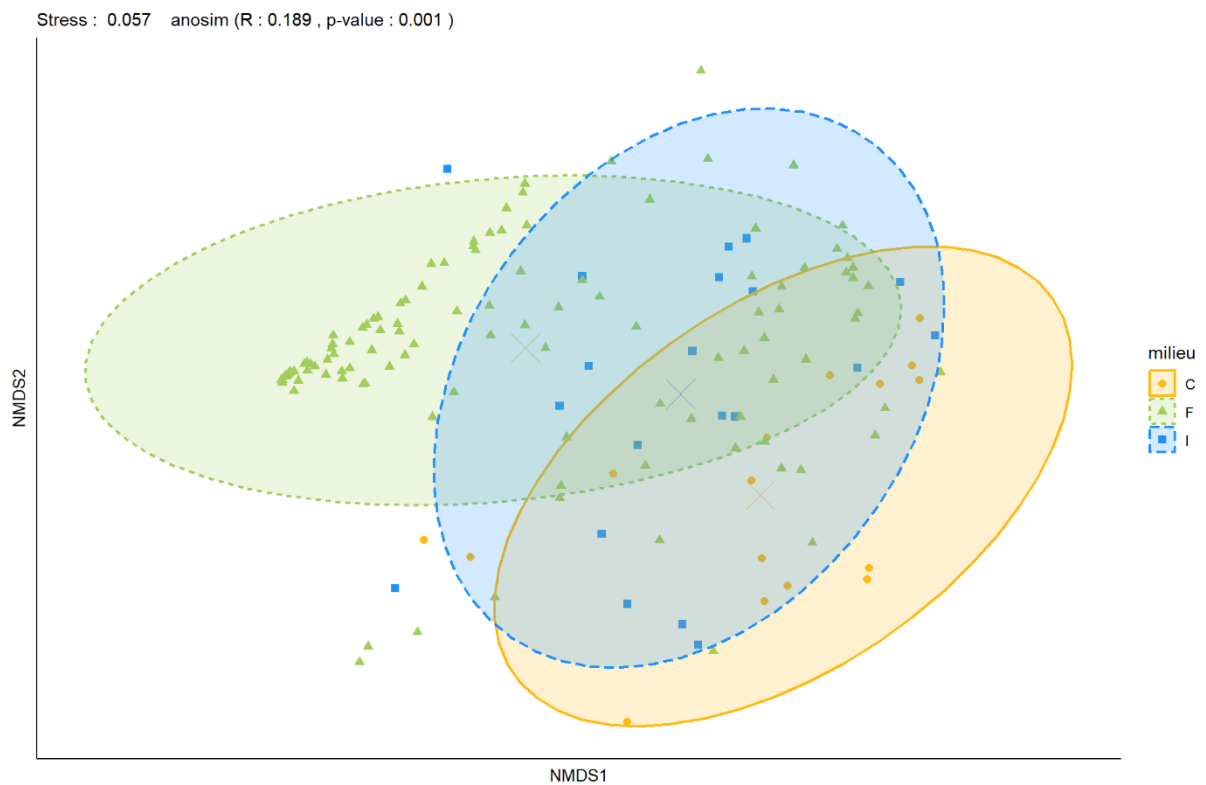


Figure 51 : NMDS des valeurs d'Ellenberg selon le milieu d'origine

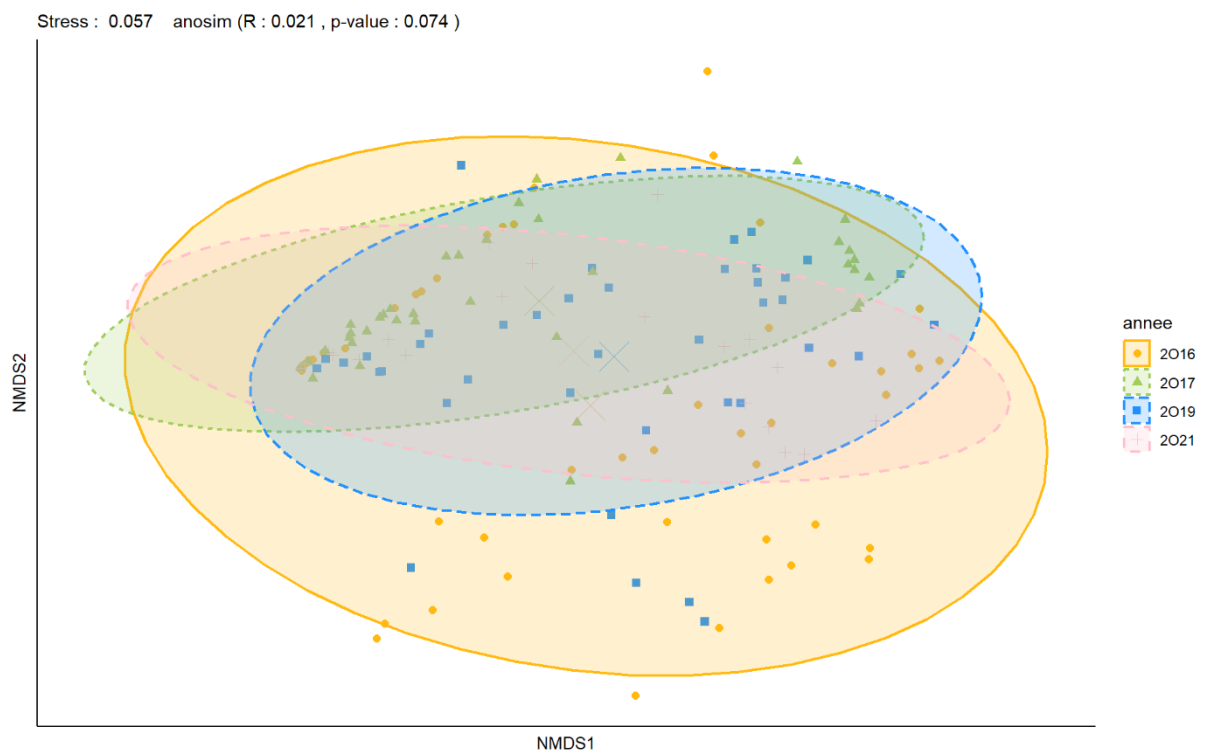


Figure 52 : NMDS des valeurs d'Ellenberg selon la date

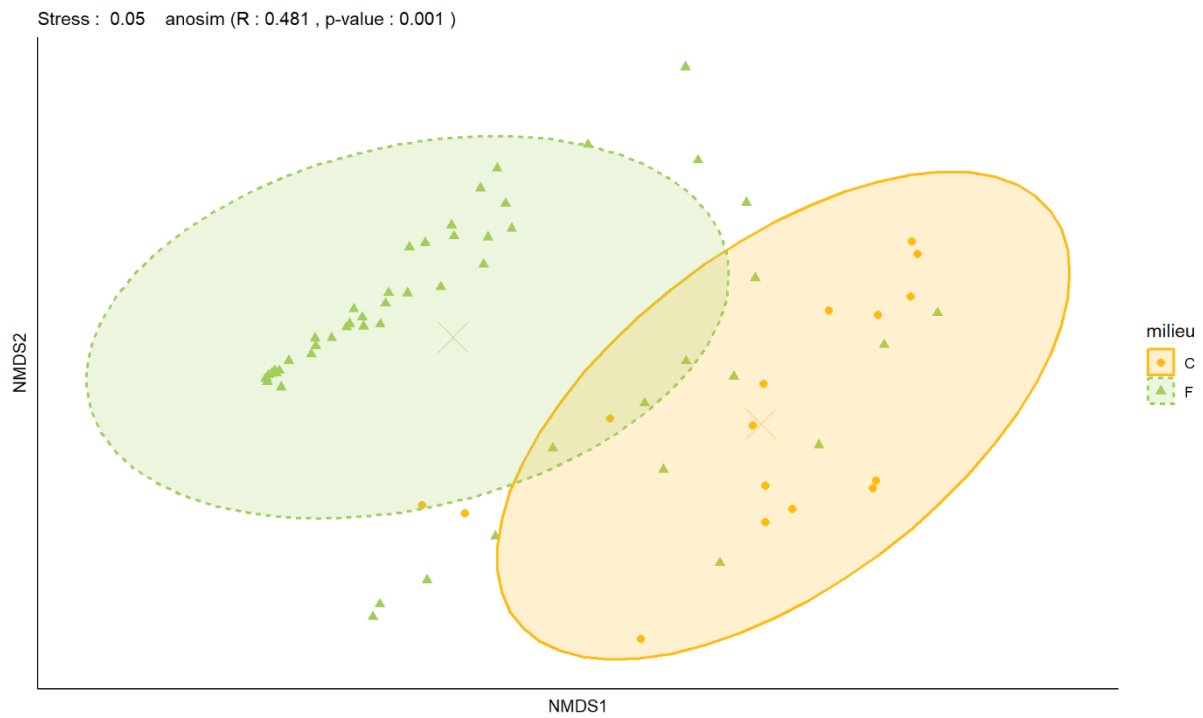


Figure 53 : NMDS des valeurs d'Ellenberg selon le milieu d'origine - Parc A

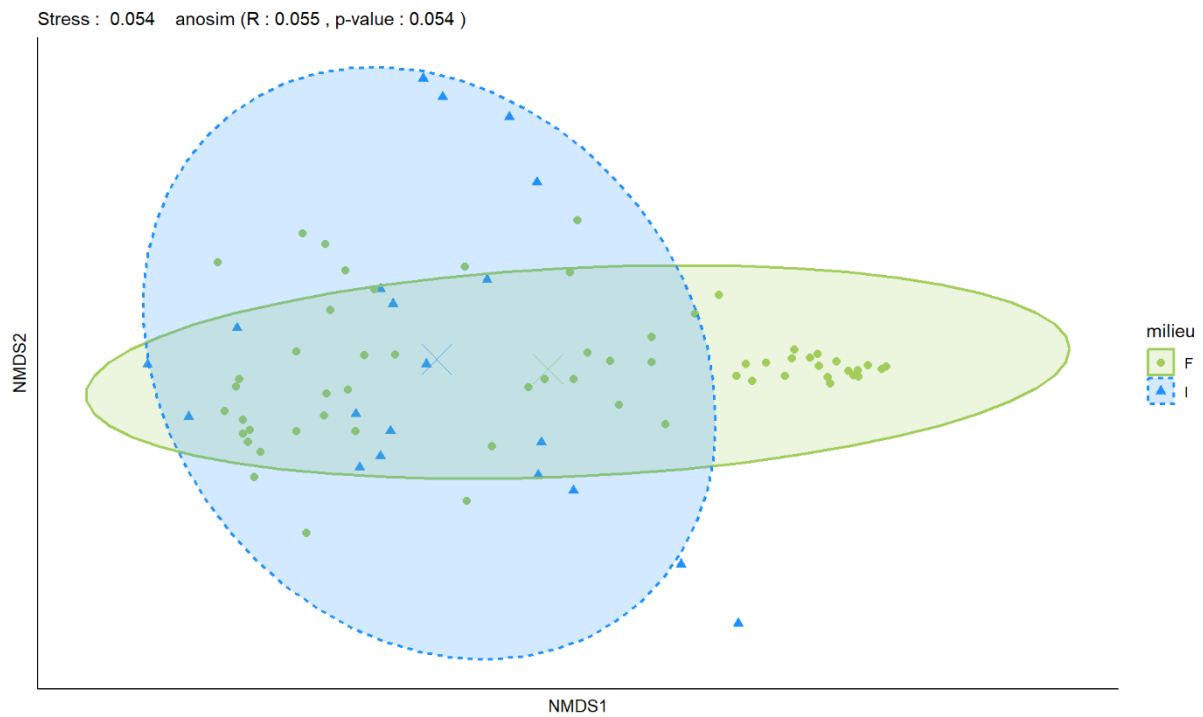


Figure 54 : NMDS des valeurs d'Ellenberg selon le milieu d'origine - Parc B

PERMANOVA

Tableau 6 : Résultats des PERMANOVA (*p*-value et R^2)

	Les 2 parcs		Parc A	Parc B
	Milieu	Année	Milieu	Milieu
P-value	0,001	-	0,001	0,043
R²	15%	4%	30%	4
	- = ns	p-value : *	p-value : **	p-value : ***

ESPECES INDICATRICES

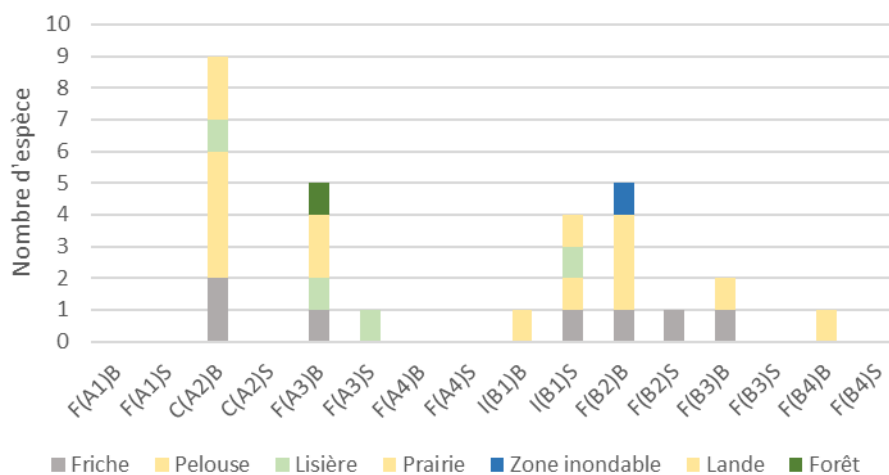


Figure 55 : Nombre et type d'espèces indicatrices par station (Annexes 24 à 26)

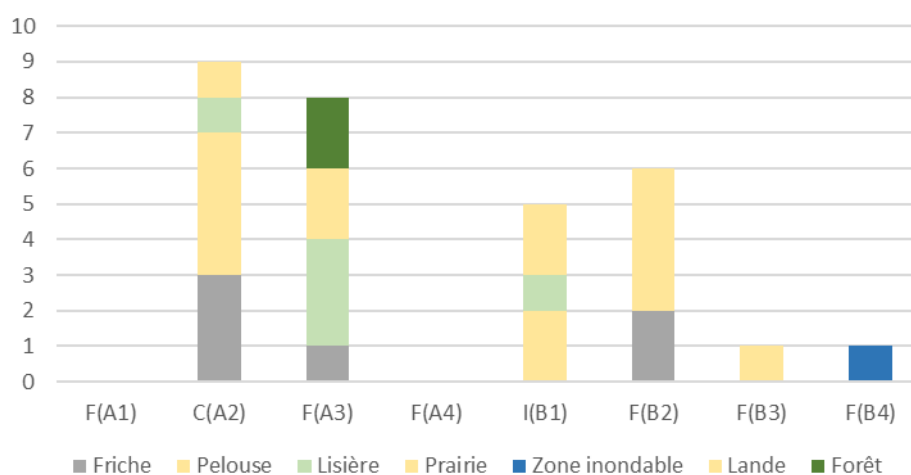


Figure 56 : Nombre et type d'espèces indicatrices par parc (Annexes 27 à 29)

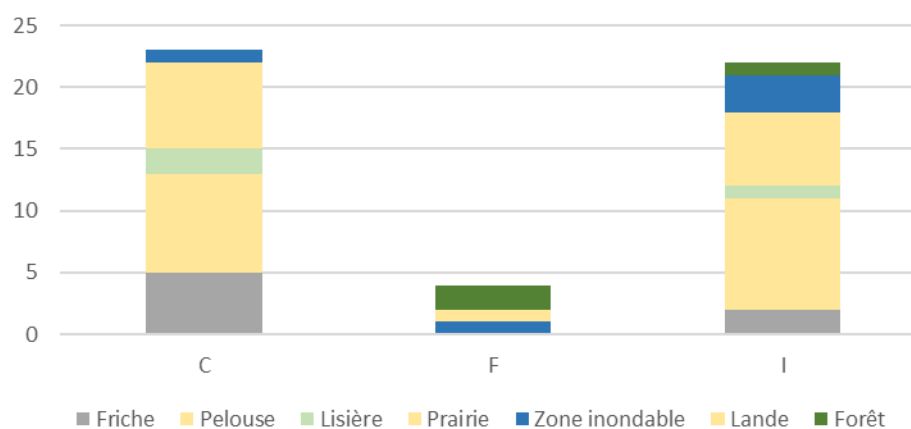


Figure 57 : Nombre et type d'espèces indicatrices par milieu (Annexes 30 à 32)

ANOVA

Test : Nombre d'espèces indicatrices ~ Milieu et Date

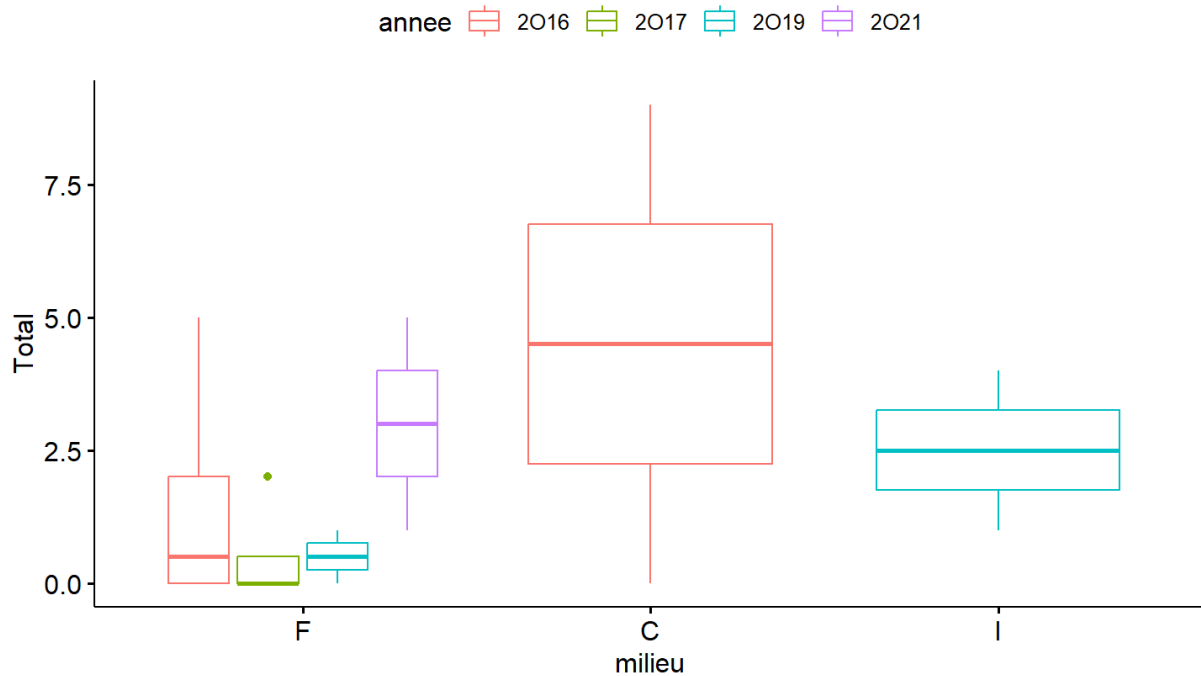
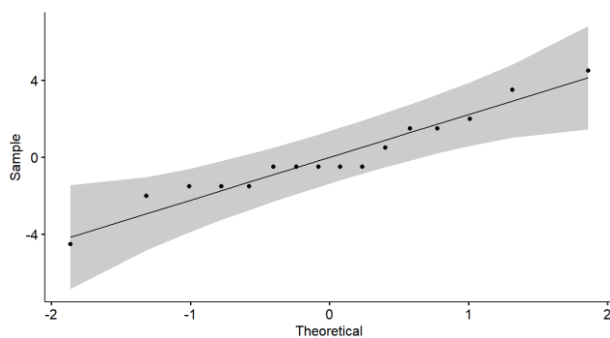


Figure 58 : Boxplots du nombre d'sp indicatrices selon le milieu et l'année



p-value Shapiro > 0,05

L'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée, les données sont normalement distribuées. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Figure 59 : Normalité des résidus - Sp indicatrices

La p-value du test de Bartlett est de 0,28, supérieure à 0,05. L'hypothèse nulle n'est pas rejetée, les variances des échantillons sont identiques et il y a donc une homogénéité des variances. Il est possible de continuer l'ANOVA.

Les hypothèses pour réaliser une ANOVA sont respectées. L'ANOVA va être réalisée.

Les p-value qui ressortent de l'ANOVA ne sont pas significatives.

Test : Espèces indicatrices Forêt ~ Milieu et Date

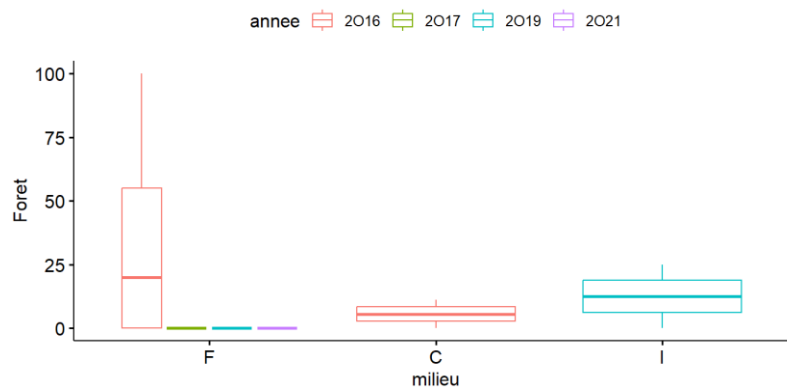


Figure 60 : Boxplots des sp "Forêts" selon le milieu et l'année

p-value Shapiro < 0,05

L'hypothèse nulle est rejetée, les données ne sont pas normalement distribuées. Il n'est pas possible de continuer l'ANOVA. Le test de Kruskal-Wallis va être réalisé.

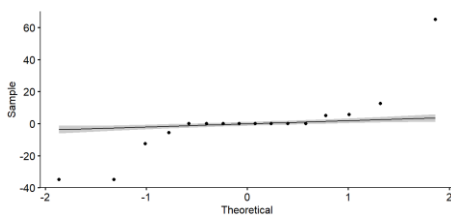


Figure 61 : Normalité des résidus - Forêt

Test : Espèces indicatrices Friche ~ Milieu et Date

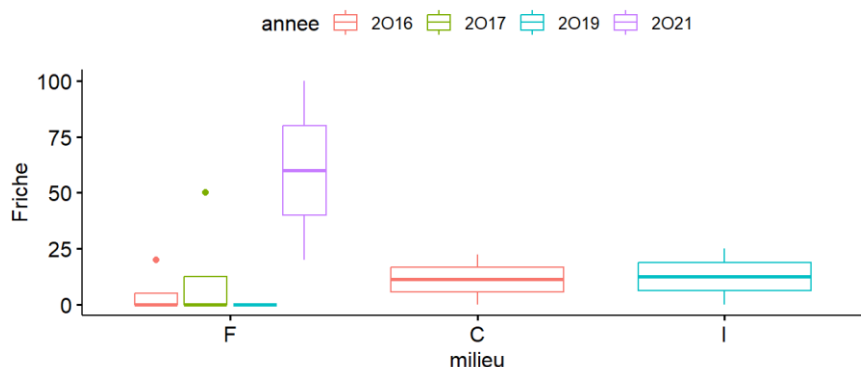


Figure 62 : Boxplots des sp "Friches" selon le milieu et l'année

p-value Shapiro > 0,05

L'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée et donc les données sont normalement distribuées. Il est possible de continuer l'ANOVA.

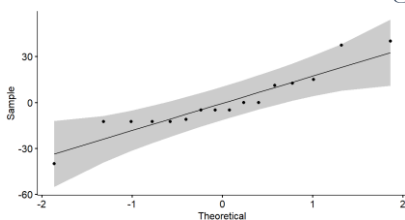


Figure 63 : Normalité des résidus - Friche

La p-value du test de Bartlett est de $2,2 \times 10^{-16}$, inférieure à 0,05. L'hypothèse nulle est rejetée, les variances des échantillons ne sont pas identiques et il y a donc une hétérogénéité des variances. Il n'est pas possible de continuer l'ANOVA. Le test de Kruskal-Wallis va être réalisé.

Kruskal-Wallis

Test : Espèces indicatrices Forêt ~ Milieu

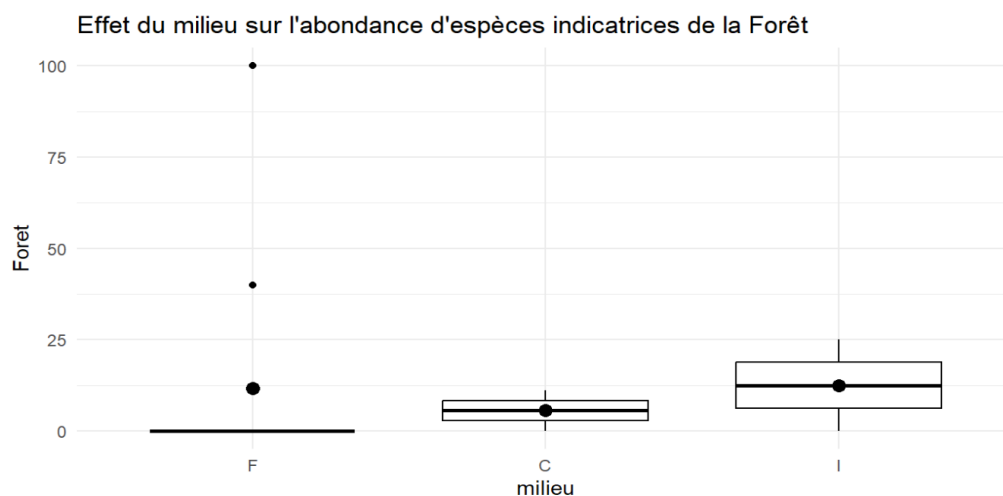


Figure 64 : Sp "Forêts" par milieu avec tests de significativité (*p-values*)

La p-value de Kruskal est supérieure à 0,05, H0 ne peut pas être rejetée, il n'existe pas de différence significative entre les milieux.

Test : Espèces indicatrices Forêt ~ Date

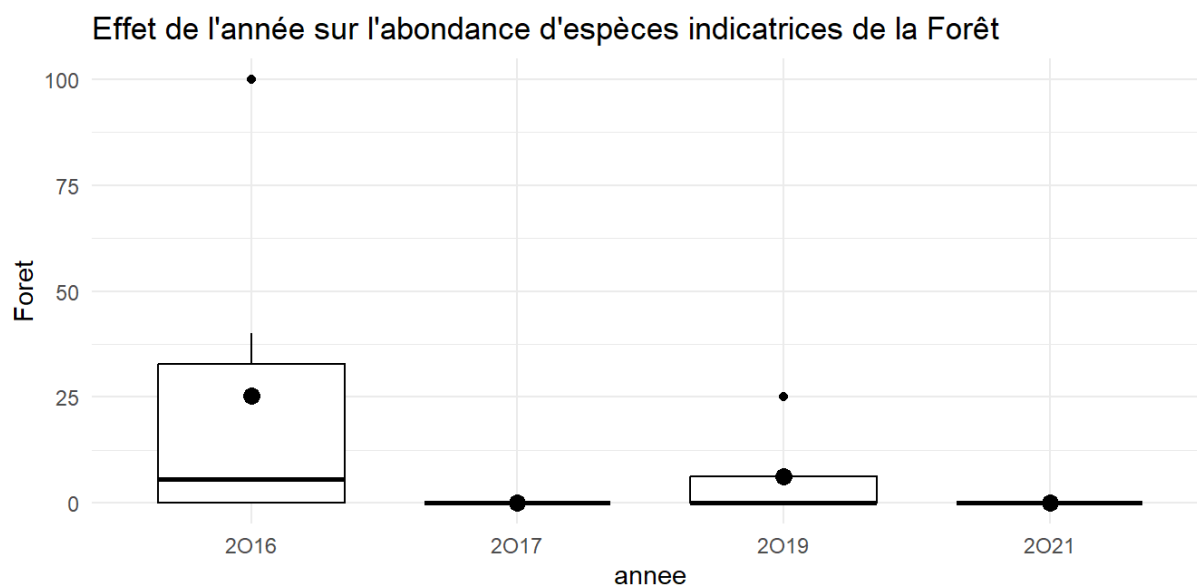


Figure 65 : Sp "Forêts" par date avec tests de significativité (*p-values*)

La p-value de Kruskal est supérieure à 0,05, H0 ne peut pas être rejetée, il n'existe pas de différence significative entre les années.

Test : Espèces indicatrices Friche ~ Milieu

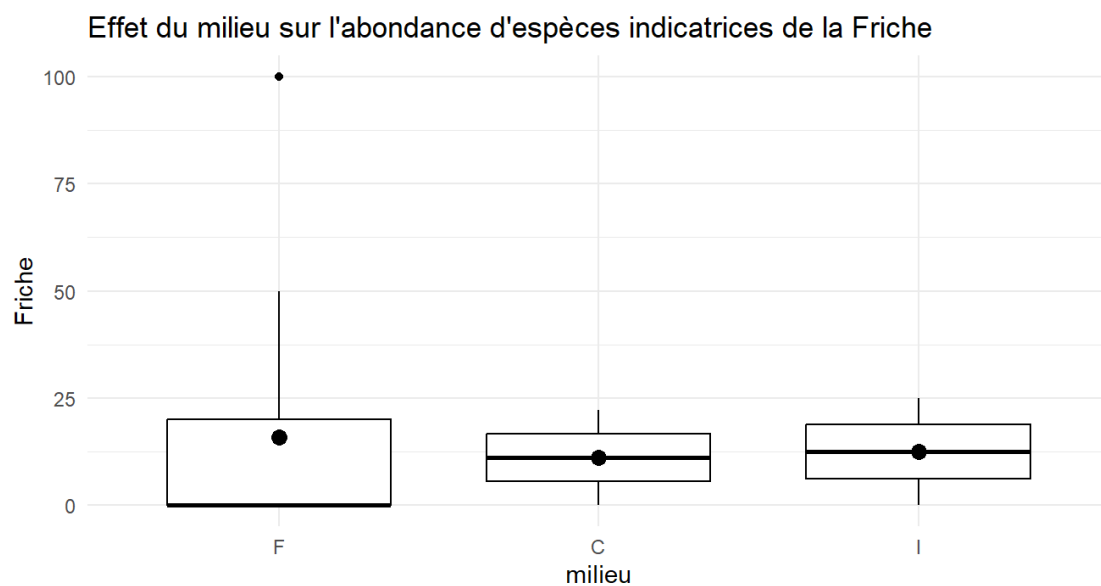


Figure 66 : Sp "Friches" par milieu avec tests de significativité (p-values)

La p-value de Kruskal est supérieure à 0,05, H0 ne peut pas être rejetée, il n'existe pas de différence significative entre les milieux.

Test : Espèces indicatrices Friche ~ Date

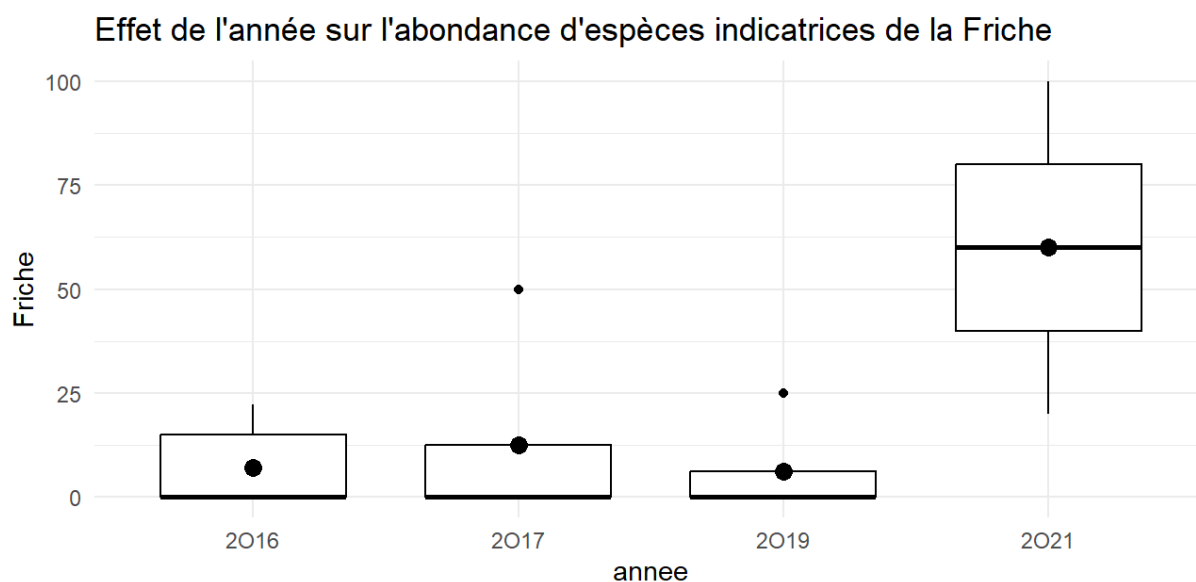


Figure 67 : Sp "Friches" par milieu avec tests de significativité (p-values)

La p-value de Kruskal est supérieure à 0,05, H0 ne peut pas être rejetée, il n'existe pas de différence significative entre les années.

DISCUSSION

INFLUENCE DU MILIEU D'ORIGINE

Les analyses mettent en évidence une **influence significative des milieux d'origine** sur les indices de biodiversité. Toutefois, **contrairement aux hypothèses initiales**, les parcs solaires issus de milieux forestiers présentent généralement des indices de diversité plus faibles que ceux issus de carrières ou de sites industriels : LMER de la Richesse Spécifique ($F < C$) (Figure 5) et Tests de Kruskal de la Richesse Spécifique ($F < I$) (Figure 8), Shannon ($F < C$) (Figure 14), Simpson ($F < C$) (Figure 20) et Piélou ($F < C$) (Figure 26). L'indice de Shannon, mesurant la diversité spécifique en intégrant la richesse et l'équité des espèces, révèle également des différences significatives entre les milieux originels (Figure 5). L'ancien site de **carrière affiche la valeur la plus équilibrée**, ce qui indique une distribution homogène des espèces. En revanche, les sites industriels et forestiers montrent des valeurs plus faibles, traduisant une dominance par quelques espèces. L'indice de Simpson confirme une tendance similaire, mettant en évidence une **homogénéité des communautés dans les anciens sites forestiers**, qui contrastent avec les valeurs plus élevées des stations Carrières (Figure 20). L'indice de Piélou, de même, indique une meilleure répartition des abondances dans l'ancien parc Carrière (Figure 26). Ce parc a donc une diversité floristique plus élevée, aussi bien en termes de richesse qu'en terme d'hétérogénéité (pas d'espèce dominante). Il serait pertinent d'explorer l'hypothèse selon laquelle le milieu forestier, bien qu'initialement riche en espèces floristiques, serait trop différent du milieu parc solaire. Cela **ne permettrait pas aux espèces**, sous forme de graine par exemple, **de s'adapter à ce nouvel environnement** avec des contraintes écologiques totalement différentes. Une autre hypothèse sera développée dans la suite de la discussion pour tenter d'expliquer cette situation.

Bien que les données du test de Kruskal-Wallis ne soient pas optimales, l'information quadrat ayant dû être rajoutée pour montrer une différence d'abondance d'espèces exotiques, une information peut tout-de-même être exploitée. Il s'agit de la seule p-value significative pour un couple avec le même emplacement : Bordure, entre les sites forestiers et industriels (Figure 32). Le milieu forestier possède moins d'espèces exotiques au niveau de ses bordures que le milieu industriel sur ces bordures. Cependant, comme le prouve le tableau (Tableau 4), la moyenne du ratio par parc pour chaque milieu reste sensiblement identique.

L'analyse des espèces indicatrices révèle **peu d'information** (Figure 55 à Figure 67). Les analyses statistiques n'ont pas permis de démontrer de différences significatives entre milieux ni au fil du temps pour la plupart des espèces indicatrices. Graphiquement, les parcs forestiers de 2016 ont davantage d'espèces indicatrices de Forêt (Figure 60) et les parcs forestiers de 2021 par des espèces de Friche (Figure 62). Cela pourrait également être expliqué par la nouvelle hypothèse.

IMPACTS TEMPORELS

Les traits fonctionnels apportent une nouvelle perspective sur l'effet d'héritage des milieux d'origine. Les parcs les plus récents (2019 et 2021) semblent conserver davantage les caractéristiques des milieux initiaux, peut-être grâce à des reliques telles que des systèmes mycorhiziens ou des banques de graines. Cette **persistance**, observée dans l'ACP (Figure 38) et confirmée par les PERMANOVA (Tableau 6), est particulièrement marquée pour des traits comme l'humidité du sol ou la teneur en matière organique, des éléments liés aux forêts.

Une analyse plus détaillée révèle que les parcs issus de milieux forestiers abritent plus d'**espèces ombrophiles** (Figure 39) et adaptées aux sols riches (Figure 49) et humides (Figure 45), en contraste avec les parcs de carrière ou industriels, où les **espèces héliophiles** dominent. Ces observations confirment en partie l'hypothèse selon laquelle les caractéristiques des milieux d'origine persistent dans la flore des parcs solaires.

- Lumière (Figure 39) : Les anciens sites forestiers accueillent une majorité d'espèces ombrophiles, adaptées à une faible luminosité due à la couverture arborée dense. À l'opposé, les espèces des sites industriels et de carrière sont majoritairement héliophiles, habituées à une exposition directe et continue au soleil sans protection naturelle, ce qui favorise leur développement dans ces milieux ouverts.
- Matière Organique (Figure 49) : Les sites forestiers hébergent des espèces optimisées pour des sols riches en matière organique. En forêt, la biomasse est constamment renouvelée par le cycle de décomposition, assurant un apport continu de matière organique disponible pour la végétation. En revanche, les sols des sites industriels et de carrière, plus arides et pauvres, ne procurent pas ces ressources écologiques essentielles.
- Humidité du sol (Figure 45) : À l'instar de la matière organique, les sols des anciens sites forestiers sont plus humides, favorisant les espèces hydrophiles. Ce contraste s'explique par les effets combinés d'une faible lumière, qui limite l'évapotranspiration, et d'une accumulation organique élevée, qui retient mieux l'eau. Les sols exposés des carrières et des sites industriels, en revanche, sont plus sujets à l'assèchement.

La PERMANOVA (Tableau 6) et les NMDS (Figure 51 à Figure 54) confirment bien qu'il existe une **différence significative dans les valeurs d'Elleberg entre les milieux**. Elles montrent une différence significative dans les valeurs entre les milieux mais pas entre les années.

Cependant, les espèces exotiques, plus présentes dans les parcs récents (Figure 33), collabore le fait que le "Legacy Effect" peut à la fois être positif que négatif (Zweifel, 2020). Il est probable que les perturbations liées à la construction des parcs favorisent temporairement ces espèces, en raison, par exemple, de l'introduction accidentelle de graines exotiques lors des travaux.

VARIABLES ADDITIONNELLES POUR EXPLIQUER LES RESULTATS

Dans l'ensemble des tests et des graphiques réalisés, des résultats **contredisent les hypothèses énoncées** au début de l'étude. Le sujet de ce PRI porte sur les effets d'héritage. C'est pour cette raison que les variables **milieu d'origine et date** ont été principalement pris en compte. Cependant, soit celles-ci n'expliquent qu'une faible partie des différences soit elles ne permettent tout simplement pas d'expliquer les différences observées. Il faut donc se demander s'il n'existe pas une **autre variable**, connue ou non, qui pourrait expliquer les résultats. Il s'agit de la **localisation du relevé** (Sous-Panneau ou Bordure) et du **mode de gestion** (Pâturage et/ou Fauche). Une distinction claire et significative a été prouvée entre les relevés Sous-Panneau et en Bordure : dans les modèles Poisson des indices (différences significatives pour l'ensemble des indices hormis celui de Pielou), lors des ACP (Figure 38) et MDS (Figure 37) (les B et SP sont regroupés ensemble, par exemple SP industriel-SP Carrière sont ensemble et B-Industriel et SP-Carrière également) et lors du test de Kruskal-Wallis pour le ratio d'espèces exotiques (Figure 32). En prenant en compte le mode de gestion, il est possible de mieux comprendre les résultats.

- Richesse Spécifique : Comme mentionné précédemment, la richesse spécifique en 2016 est inférieure à celle observée en 2019. Cette différence peut s'expliquer par le mode de gestion des parcs. Les parcs datant de 2019 sont soumis à un pâturage, tandis que ceux de 2016 sont entretenus par fauche. Le pâturage pourrait favoriser une dispersion plus large des espèces végétales par zoochorie : les graines s'accrochent au pelage des animaux ou sont transportées dans leur système digestif, contribuant ainsi à une augmentation de la richesse floristique (H.REN, 2023 ; B.Wang, 2020).
- Indices de biodiversité : Les indices de Shannon, Simpson et Pielou révèlent une biodiversité plus élevée, équilibrée et hétérogène dans l'ancienne carrière datant de 2016. Ce constat, bien qu'intrigant lorsque l'année est la seule considérée, peut également être lié au mode de gestion. La fauche, à l'inverse du pâturage, semble avantageuse pour la biodiversité car elle évite la sélection exercée par les animaux. Ces derniers consomment certaines espèces de manière préférentielle ce qui peut déséquilibrer les abondances floristiques et creuser les écarts. En fauchant, chaque espèce est traitée de manière équitable ce qui favorise une distribution plus homogène et explique les différences observées.
- Espèces exotiques : Une plus grande abondance d'espèces exotiques est observée en 2019 et 2021 comparée à 2016, une tendance similaire à celle de la richesse spécifique. Une hypothèse complémentaire se base ici aussi sur le rôle du pâturage. Les animaux introduisent passivement des graines exotiques transportées depuis d'autres sites, soit accrochées à leur pelage, soit par le biais de leur système digestif. En effet, la période de pâturage n'est pas forcément à l'année. Il s'agit souvent de la période entre avril et novembre (Solagro, 2019).

Avec ces résultats, une tendance se dégage : plus que le LE, c'est principalement l'emplacement du relevé, qu'il soit en Bordure ou Sous-Panneau, et la gestion du parc, en fauche ou en pâturage, qui impactent la composition floristique retrouvée.

CONCLUSION

Cette étude cherchait à **comprendre l'impact des effets d'héritage** (Legacy Effect) sur les communautés végétales des parcs photovoltaïques et à répondre à la question : **Comment les effets d'héritage impactent-ils les communautés végétales des parcs photovoltaïques ?**

Les résultats montrent que le Legacy Effect joue un rôle déterminant dans les premières phases d'installation des parcs photovoltaïques. Les communautés végétales sont fortement influencées par les caractéristiques biotiques et abiotiques du milieu d'origine, notamment en termes de **traits fonctionnels adaptés aux conditions environnementales passées**. Par exemple, les parcs implantés sur d'anciens milieux forestiers conservent des traits écologiques liés à ce milieu avec des espèces préférant l'ombre, les sols riches en matière organique et à forte humidité, tandis que les sites industriels ou de carrière ont davantage d'espèces rudérales adaptées aux sols pauvres en matières organiques et aux conditions plus arides.

Cependant, une modification floristique tend à s'opérer principalement sous l'**effet des modes de gestion**, tels que le pâturage ou la fauche. Ces pratiques influencent la dynamique des communautés végétales en sélectionnant indirectement certaines espèces, en particulier via des processus comme la zoochorie. L'influence du **Legacy Effect s'atténue progressivement**. La gestion devient donc le principal facteur pour garder un niveau de biodiversité acceptable dans les parcs.

Il convient de souligner que cette étude repose sur un **jeu de données limité** comprenant uniquement trois types de milieux originels. Cette restriction empêche d'utiliser certains tests paramétriques. Par conséquent, les résultats doivent être envisagés avec prudence. Des recherches plus approfondies, intégrant un échantillon plus vaste et diversifié de milieux d'origine, pourraient fournir des résultats plus solides et généralisables. Ces travaux complémentaires permettraient également de réaliser une analyse plus fine des tendances observées et de valider ou réfuter les hypothèses formulées dans cette étude.

Cette étude confirme que l'effet d'héritage est un mécanisme essentiel dans les premiers stades d'évolution des écosystèmes des parcs photovoltaïques. Toutefois, son influence diminue avec le temps en raison des pressions anthropiques et des interventions de gestion. L'effet d'héritage, ou du moins ce rapport, ne permet pas de statuer sur le meilleur site à choisir lors de l'implantation d'un parc photovoltaïque. Il faut, cependant, garder à l'esprit que son emprise et son activité perturbe grandement la faune et la flore et qu'il serait profitable de choisir un milieu déjà anthropisé pour limiter ces impacts néfastes.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME. (2023). *Chiffres clés des énergies renouvelables—Édition 2023*. Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-energies-renouvelables-edition-2023>

ADEME. (2024). *Photovoltaïque, sol et biodiversité : Enjeux et bonnes pratiques—YouTube*. https://www.youtube.com/watch?v=pMyyP8R-DpU&list=TLPQMjQwMjIwMjTPOA4AWDWJNw&index=10&ab_channel=ademe

Alboukadel Kassambara. (s. d.). Test de Kruskal-Wallis dans R : Excellente Référence. *Datanovia*. Consulté 26 janvier 2025, à l'adresse <https://www.datanovia.com/en/fr/lessons/test-de-kruskal-wallis-dans-r/>

Arnaud Moign. (2023, juin 27). Un guide de l'ADEME pour réduire l'impact des centrales solaires sur les sols et la biodiversité. *Techniques de l'Ingénieur*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/un-guide-de-lademe-pour-reduire-limpact-des-centrales-solaires-sur-les-sols-et-la-biodiversite-124828/>

Blackhall, M., Raffaele, E., Paritsis, J., Tiribelli, F., Morales, J. M., Kitzberger, T., Gowda, J. H., & Veblen, T. T. (2017). Effects of biological legacies and herbivory on fuels and flammability traits : A long-term experimental study of alternative stable states. *Journal of Ecology*, 105(5), 1309-1322. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12796>

Bobbitt, Z. (2021, février 25). *How to Perform Bartlett's Test in R (Step-by-Step)*. Statology. <https://www.statology.org/bartletts-test-in-r/>

DATAtab. (s. d.). *T-Test, kbi-deux, ANOVA, Régression, Corrélation...* Consulté 26 janvier 2025, à l'adresse <https://datatab.fr/tutorial/anova>

Geoffroy Marx. (2022). *Photovoltaïque et Biodiversité—Energies renouvelables & Biodiversité*. <https://eolien-biodiversite.com/programme-eolien-biodiversite/actualites/article/photovoltaïque-et-biodiversite>

Heinen, R., Hannula, S. E., De Long, J. R., Huberty, M., Jongen, R., Kielak, A., Steinauer, K., Zhu, F., & Bezemer, T. M. (2020). Plant community composition steers grassland vegetation via soil legacy effects. *Ecology Letters*, 23(6), 973-982. <https://doi.org/10.1111/ele.13497>

INPN. (s. d.). *Phytolacca americana L., 1753—Phytolaque d'Amérique, Raisin d'Amérique, Phytolaque américaine, Laque végétale*. Inventaire National du Patrimoine Naturel. Consulté 26 janvier 2025, à l'adresse https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/113418

Jackie Z. (2019). *ANOSIM Test in R*. <https://jkzorz.github.io/2019/06/11/ANOSIM-test.html>

K Cuddington. (2011). *Legacy Effects : The Persistent Impact of Ecological Interactions | Biological Theory*. <https://link.springer.com/article/10.1007/S13752-012-0027-5>

Miquel De Cáceres. (s. d.). *Indicator species analysis* [Logiciel]. Consulté 26 janvier 2025, à l'adresse <https://cran.r-project.org/web/packages/indicspecies/vignettes/IndicatorSpeciesAnalysis.html>

Perry, D. A., Oren, R., & Hart, S. C. (2008). *Forest Ecosystems*. JHU Press.

Solagro. (2019). *CO-ACTIVITÉ DU PÂTURAGE AVEC LES PARCS PHOTOVOLTAÏQUES*. https://solagro.org/images/imagesCK/files/Plaqueette_3_pages-Analyse_coactivite_.pdf

XLSTAT. (s. d.-a). *ANOVA ou Analyse de la variance*. XLSTAT, Your data analysis solution. Consulté 26 janvier 2025, à l'adresse <https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/analyse-de-la-variance-ou-anova>

XLSTAT. (s. d.-b). *Multidimensional Scaling (MDS)*. XLSTAT, Your data analysis solution. Consulté 26 janvier 2025, à l'adresse <https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/multidimensional-scaling-mds>

Zweifel, R., Etzold, S., Sterck, F., Gessler, A., Anfodillo, T., Mencuccini, M., von Arx, G., Lazzarin, M., Haeni, M., Feichtinger, L., Meusburger, K., Knuesel, S., Walthert, L., Salmon, Y., Bose, A. K., Schoenbeck, L., Hug, C., De Girardi, N., Giuggiola, A., ... Rigling, A. (2020). Determinants of legacy effects in pine trees – implications from an irrigation-stop experiment. *New Phytologist*, 227(4), 1081-1096. <https://doi.org/10.1111/nph.16582>

ANNEXES

ANNEXE 1 : SCRIPT S.....	63
ANNEXE 2 : SCRIPT SHANNON	63
ANNEXE 3 : SCRIPT SIMPSON	63
ANNEXE 4 : SCRIPT PIELOU	63
ANNEXE 5 : TELA BOTANICA SP EXOTIQUE - PHYTOLACCA DECANDRA.....	63
ANNEXE 6 : INPN - PHYTOLACCA DECANDRA	64
ANNEXE 7 : VALEURS D'ELLENBERG ET CATMINAT - PHYTOLACCA DECANDRA.....	64
ANNEXE 8 : TELA BOTANICA ELLENBER CATMINAT - PHYTOLACCA DECANDRA	64
ANNEXE 9 : SCRIPT ESPECES INDICATRICES	65
ANNEXE 10 : SCRIPT MODELE POISSON 1.....	66
ANNEXE 11 : SCRIPT MODELE POISSON 2.....	67
ANNEXE 12 : SCRIPT ANOVA.....	67
ANNEXE 13 : SCRIPT SHAPIRO	67
ANNEXE 14 : SCRIPT BARTLETT.....	67
ANNEXE 15 : SCRIPT TUCKEY	67
ANNEXE 16 : SCRIPT KRUSKAL-WALLIS.....	67
ANNEXE 17 : SCRIPT DUNN	67
ANNEXE 18 : SCRIPT PERMANOVA.....	67
ANNEXE 19 : SCRIPT NMDS.....	68
ANNEXE 20 : SCRIPT SCIRPT BOX PLOTS TRAITS FONCTIONNELS	68
ANNEXE 21 : ACP MATRICE TOTALE.....	69
ANNEXE 22 : ACP TOTAL VALEURS D'ELLENBERG.....	69
ANNEXE 23 : ACP MATRICE SELECTION	69
ANNEXE 24 : ESPECES INDICATRICES PAR STATION	70
ANNEXE 25 : ESPECES INDICATRICES PAR STATION AVEC LIAISON	70
ANNEXE 26 : ESPECES INDICATRICES PAR STATION AVEC LIAISON GRAPHIQUE.....	71
ANNEXE 27 : ESPECES INDICATRICES PAR PARC	71
ANNEXE 28 : ESPECES INDICATRICES PAR PARC AVEC LIAISON	71
ANNEXE 29 : ESPECES INDICATRICES PAR PARC AVEC LIAISON GRAPHIQUE	72
ANNEXE 30 : ESPECES INDICATRICES PAR MILIEU	72
ANNEXE 31 : ESPECES INDICATRICES PAR MILIEU AVEC LIAISON	72
ANNEXE 32 : ESPECES INDICATRICES PAR MILIEU AVEC LIAISON GRAPHIQUE.....	72

```
library("vegan")
S <- specnumber(releve)
```

Annexe 1 : Script S

```
shannon <- diversity(releve, index="shannon")
```

Annexe 2 : Script Shannon

```
simpson <- diversity(releve, index = "simpson")
```

Annexe 3 : Script Simpson

```
pielou <- shannon/log(S)
```

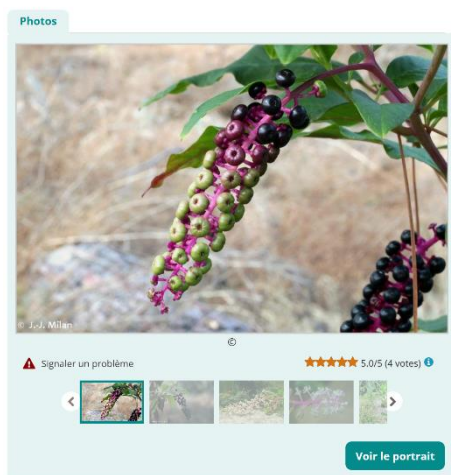
Annexe 4 : Script Piélou

[ACCUEIL](#) > [BDTFX](#) > [Phytolacca americana](#) L.

Description de Coste : *Phytolacca decandra*

3060 <i>Phytolacca decandra</i> L. Raisin d'Amérique
- . Plante vivace de 1 à 2 mètres, <u>glabre</u>, à tige dressée, épaisse, <u>striée</u>, souvent rougeâtre, à rameaux <u>dichotomes</u> - <u>feuilles</u> <u>alternes</u>, grandes, <u>ovales-lancéolées</u> <u>aigues</u>, <u>entières</u>, <u>atténuées</u> en court <u>pétiole</u>, penninervées, sans <u>stipules</u> - <u>fleurs</u> <u>blanchâtres</u> ou <u>rosées</u>, en <u>grappes</u> <u>multiflores</u> dressées, <u>pédunculées</u>, <u>opposées</u> aux <u>feuilles</u> - <u>pédicelles</u> <u>étalés</u>, plus longs que la <u>fleur</u> et la <u>bractée</u> inférieure - <u>péricarpe</u> <u>persistant</u>, à 5 <u>pétales</u> <u>ovales</u>, à la fin <u>réfléchis</u> - 10 <u>étamines</u>, insérées sur un <u>disque</u> <u>charnu</u> - 10 <u>styles</u> courts - <u>ovaire</u> <u>libre</u>, formé de 10 <u>carpelles</u> <u>verticillés</u> - <u>baie</u> <u>noire</u>, <u>globuleuse-déprimée</u>, à 10 <u>côtes</u> et <u>carpelles</u>.
Écologie: Naturalisé dans le Midi et en Corse et subspontané çà et là dans les lieux frais.
Répartition: Originnaire de l'Amérique du Nord, d'où il s'est répandu dans presque tout le globe.
Floraison: Juin-septembre. .
Usages: <u>Feuilles</u> et <u>fruits</u> purgatifs.

Annexe 5 : Tela Botanica sp exotique - *Phytolacca decandra*



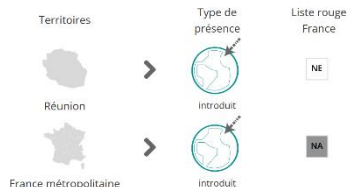
Statuts d'évaluation, de protection et de menace



évaluée

[Voir les statuts d'évaluation](#)

Statuts dans les territoires



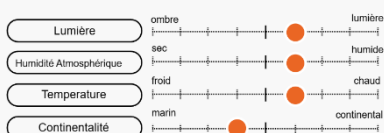
Annexe 6 : INPN - *Phytolacca decandra*

Nom latin	Exotique ?	Famille	Nom vulgaire	Lumière	Humidité atmos	T°C	Continentalité	pH	Humidité sol	Texture	Nutriment	Salinité	MO	Catminat	Type Catminat info
<i>Phytolacca americana</i>	Oui	Phytolaccacée	Phytolaque d'Amérique	1	1	1	-1	2	-1	-3	2	-4	-3	13/8.0.3.0.1	Cultures, friches & clairières forestières eutrophiles

Annexe 7 : Valeurs d'Ellenberg et Catminat - *Phytolacca decandra*

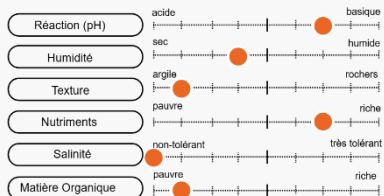
Optimum écologique

caractéristiques climatiques



voir la légende

caractéristiques du sol



● valence optimale du taxon
— zone optimale du taxon calculée à partir des optimums pour les taxons inférieurs

voir la légende

Julve, Ph., 2021 ff. - Baseflor. Index botanique, écologique et chorologique de la flore de France. Version : 27 avril 2021. <https://www.tela-botanica.org/projets/phytosociologie> [Voir toutes les métadonnées](#)

Phytosociologie

Le code catminat de ce taxon est [13/8.0.3.0.1](#)

Il est caractéristique du syntaxon de niveau présenté dans le tableau ci-dessous avec ses niveaux supérieurs.

[[Voir le site Catminat pour en savoir plus.](#)]

13/	Cultures, friches & clairières forestières eutrophiles Cultures, friches, coupes & clairières forestières à sols perturbés, lieux plus ou moins rudéralisés, & zones naturelles de caractères écologiques similaires (pieds de falaises, ourlets dunaires...). L'enrichissement trophique est lié aux animaux, aux actions de l'homme, à la fixation symbiotique d'azote, ou à la minéralisation active dans le sol consécutive aux éclaircies & aux remontées de nappe d'eau.	Réf. Syn. Taxons
13/8.	Epilobietea angustifolii Tüxen & Preising in Tüxen 1950 mégaphorbiaies pionnières et ronciers de clairières médio-européennes, mésoséchohydriques à mésoséchohydriques répartition : France médio-européenne	Réf. Syn. Taxons
13/8.0.3	Atropetalia bellae-donnae Vlieger 1937 mégaphorbiaies pionnières de clairières basophiles, médio-européennes, mésoséchohydriques, mésoséchohydriques répartition : France médio-européenne	Réf. Syn. Taxons
13/8.0.3.0.1	Atropion bellae-donnae Braun-Blanquet 1930 ex Aichinger 1933 mégaphorbiaies pionnières de clairières basophiles, médio-européennes, mésoséchohydriques, mésoséchohydriques rép. France médio-européenne	Réf. Syn. Taxons

JULVE, PH., 2024 ff. baseveg. World vegetation database. [01 juin 2024]. Programme Catminat.

<https://www.tela-botanica.org>.

[Voir toutes les métadonnées](#)

Annexe 8 : Tela Botanica Ellenber Catminat - *Phytolacca decandra*

```

sp_indicatrice_PFE[, -1] <- lapply(sp_indicatrice_PFE[, -1], as.numeric)
sp_indicatrice_PFE$habitats <- as.factor(sp_indicatrice_PFE$habitats)
str(sp_indicatrice_PFE)
group <- as.factor(sp_indicatrice_PFE$habitats)
sp_indicatrice_PFE <- sp_indicatrice_PFE %>% select(-habitats)
indval = multipatt(sp_indicatrice_PFE, group, control = how(nperm = 100))
summary(indval)

```

Annexe 9 : Script espèces indicatrices

```

mod1_poisson <- glm(
  pielou ~ milieu + quadrat + annee,
  family = poisson,
  data = Shannon)

mod1_poisson <- step(mod1_poisson)

mod1_poisson |>
  tbl_regression(exponentiate = TRUE) |>
  bold_labels()

mod1_poisson |>
  ggcoef_table(exponentiate = TRUE)

broom.helpers::plot_marginal_predictions(mod1_poisson) |>
  patchwork::wrap_plots()

observed_vs_theoretical <- function(model) {
  observed <- model.response(model.frame(model))
  theoretical <- simulate(model, nsim = 1)
  theoretical <- theoretical[[1]]
  df <- dplyr::tibble(
    status = c(
      rep.int("observed", length(observed)),
      rep.int("theoretical", length(theoretical)) ),
    values = c(observed, theoretical) )
  if (is.numeric(observed) && any(observed != as.integer(observed))) {
    ggplot2::ggplot(df) +
      ggplot2::aes(x = values, fill = status) +
      ggplot2::geom_density(
        alpha = .5,
        position = "identity") +
      ggplot2::theme_light() +
      ggplot2::labs(fill = NULL)
  } else {
    ggplot2::ggplot(df) +
      ggplot2::aes(x = values, fill = status) +
      ggplot2::geom_bar(
        alpha = .5,
        position = "identity"
      ) +
      ggplot2::theme_light() +
      ggplot2::theme(
        panel.grid.major.x = ggplot2::element_blank(),
        panel.grid.minor.x = ggplot2::element_blank()
      ) +
      ggplot2::labs(fill = NULL)}}

mod1_poisson |>
  observed_vs_theoretical()

```

Annexe 10 : Script Modèle Poisson 1

```
mod1_poisson <- glm(
  pielou ~ milieu + quadrat + annee,
  family = poisson,
  data = Shannon)
```

Annexe 11 : Script Modèle Poisson 2

```
anova <- anova_test(tableau = Parc, Couv_veget ~ Position*Annee)
```

Annexe 12 : Script ANOVA

```
model <- lm(Couv_veget ~ Position*Annee, data = tableau)
shapiro.test(residuals(model))
```

Annexe 13 : Script Shapiro

```
model <- lm(Couv_veget ~ Position*Annee, data = tableau)
plot(model, 1)
bartlett.test(tableau = Parc, Couv_veget ~ interaction(Position,Annee))
```

Annexe 14 : Script Bartlett

```
tukey <- Parc %>% tukey_hsd(Couv_veget ~ Position * Année)
```

Annexe 15 : Script Tuckey

```
model <- lm(Couv_veget ~ Année, data = tableau)
res.kruskal <- kruskal_test(Couv_veget ~ Année, data = tableau)
effsize <- tableau %>%
  kruskal_effsize(Couv_veget ~ Année)
```

Annexe 16 : Script Kruskal-Wallis

```
pwc <- dunn.test(tableau$Couv_veget, tableau$Annee, method = "bonferroni", kw = FALSE)
```

Annexe 17 : Script Dunn

```
adonis2(tableau~ellemberg$annee, method="bray",na.action=na.exclude, permutations = 999)
```

Annexe 18 : Script PERMANOVA

```

nmds<-metaMDS(tableau, distance = "bray")

stressplot(nmds)

scores_nmds<-as.data.frame(nmds$points)

scores_nmds$annee = elleberg$annee

scores_nmds$annee<-as.character(scores_nmds$annee)

dist_veg<-vegdist(tableau)

scores_nmds <-scores_nmds[,-3]
colnames(scores_nmds)<-c("NMDS1", "NMDS2","annee")

centroids <- scores_nmds %>%

  group_by(annee) %>%

  summarise(NMDS1_centroid = mean(NMDS1),

            NMDS2_centroid = mean(NMDS2))

```

Annexe 19 : Script NMDS

```

creer_boxplot <- function(variable) {
  ggboxplot(tableau, x = "Parc", y = variable, color = "Parc",palette =c("dodgerblue1","darkolivegreen3","darkolivegreen3","darkolivegreen3")) +
    stat_summary(fun = mean, geom = "point", size = 3, color = "red") + # Point pour la moyenne
    labs(title = paste("Box Plot de", variable)) +
    theme_minimal()
}

variables_haut <- c("Lumière", "Humidité atmos", "Temperature", "Continentalité")
variables_bas <- c("Humidité sol", "Texture", "Nutriment", "Salinité", "MO")

plots_haut <- lapply(variables_haut, creer_boxplot)
plots_bas <- lapply(variables_bas, creer_boxplot)

graphique_final <- (wrap_plots(plots_haut, ncol = 4) / wrap_plots(plots_bas, ncol = 5)) +
  plot_layout(guides = 'collect') # Permet d'harmoniser les légendes

print(graphique_final)

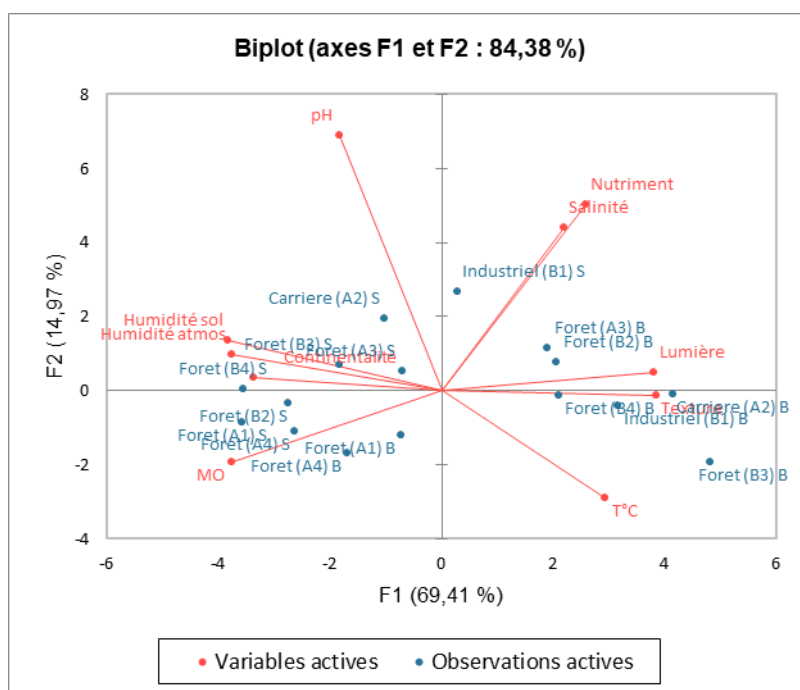
```

Annexe 20 : Script Script Box plots Traits fonctionnels

Cosinus carrés des variables :					
	F1	F2	F3	F4	F5
Lumière	0,941	0,003	0,016	0,003	0,003
Humidité atr	0,919	0,013	0,009	0,000	0,037
T°C	0,560	0,117	0,110	0,204	0,000
Continentalit	0,737	0,002	0,011	0,010	0,238
pH	0,218	0,665	0,043	0,033	0,007
Humidité sol	0,947	0,026	0,000	0,003	0,006
Texture	0,960	0,000	0,002	0,027	0,001
Nutriment	0,433	0,349	0,157	0,015	0,022
Salinité	0,310	0,269	0,362	0,039	0,001
MO	0,916	0,052	0,008	0,015	0,004

Les valeurs en gras correspondent pour chaque variable au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand

Annexe 21 : ACP Matrice totale



Annexe 22 : ACP Total Valeurs d'Ellenberg

Cosinus carrés des variables :					
	F1	F2	F3	F4	F5
Lumière	0,901	0,001	0,028	0,065	0,004
T°C	0,652	0,068	0,280	0,000	0,000
pH	0,219	0,687	0,034	0,060	0,001
Humidité sol	0,957	0,020	0,003	0,008	0,012
Nutriment	0,453	0,472	0,001	0,072	0,000
MO	0,897	0,068	0,026	0,002	0,000

Les valeurs en gras correspondent pour chaque variable au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand

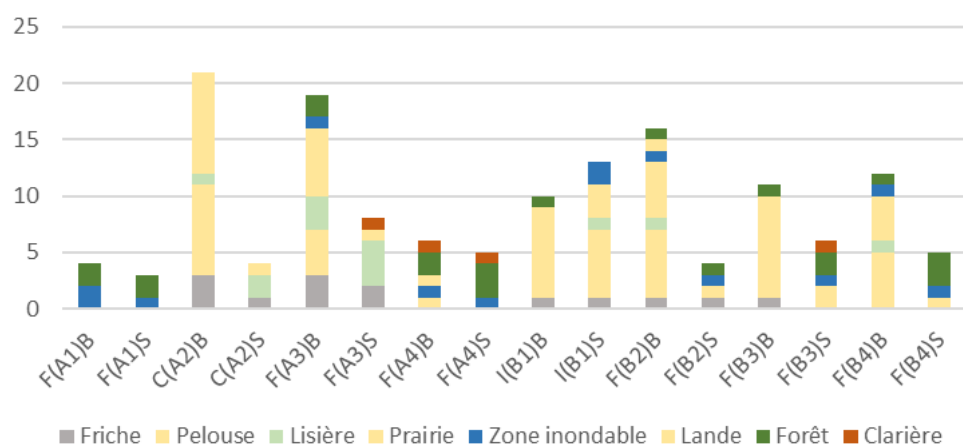
Annexe 23 : ACP Matrice sélection

Type	Friche	Pelouse	Lisière	Prairie	Zone inondable	Lande	Forêt	Clarière	total
F(A1)B	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F(A1)S	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C(A2)B	2	4	1	2	0	0	0	0	9
C(A2)S	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F(A3)B	1	0	1	2	0	0	1	0	5
F(A3)S	0	0	1	0	0	0	0	0	1
F(A4)B	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F(A4)S	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I(B1)B	0	0	0	1	0	0	0	0	1
I(B1)S	1	1	1	1	0	0	0	0	4
F(B2)B	1	2	0	1	1	0	0	0	5
F(B2)S	1	0	0	0	0	0	0	0	1
F(B3)B	1	0	0	0	0	1	0	0	2
F(B3)S	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F(B4)B	0	1	0	0	0	0	0	0	1
F(B4)S	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Annexe 24 : Espèces indicatrices par station

Type	Friche	Pelouse	Lisière	Prairie	Zone inondable	Lande	Forêt	Clarière	total	Lié avec (nbr grp)
F(A1)B	0	0	0	0	2	0	2	0	4	4
F(A1)S	0	0	0	0	1	0	2	0	3	3
C(A2)B	3	8	1	9	0	0	0	0	21	9
C(A2)S	1	0	2	1	0	0	0	0	4	2
F(A3)B	3	4	3	6	1	0	2	0	19	11
F(A3)S	2	0	4	1	0	0	0	1	8	5
F(A4)B	0	0	0	1	1	1	2	1	6	6
F(A4)S	0	0	0	0	1	0	3	1	5	5
I(B1)B	1	6	0	2	0	0	1	0	10	9
I(B1)S	1	6	1	3	2	0	0	0	13	7
F(B2)B	1	6	1	5	1	1	1	0	16	10
F(B2)S	1	1	0	0	1	0	1	0	4	2
F(B3)B	1	6	0	2	0	1	1	0	11	8
F(B3)S	0	0	0	2	1	0	2	1	6	6
F(B4)B	0	5	1	4	1	0	1	0	12	10
F(B4)S	0	0	0	1	1	0	3	0	5	5

Annexe 25 : Espèces indicatrices par station avec liaison



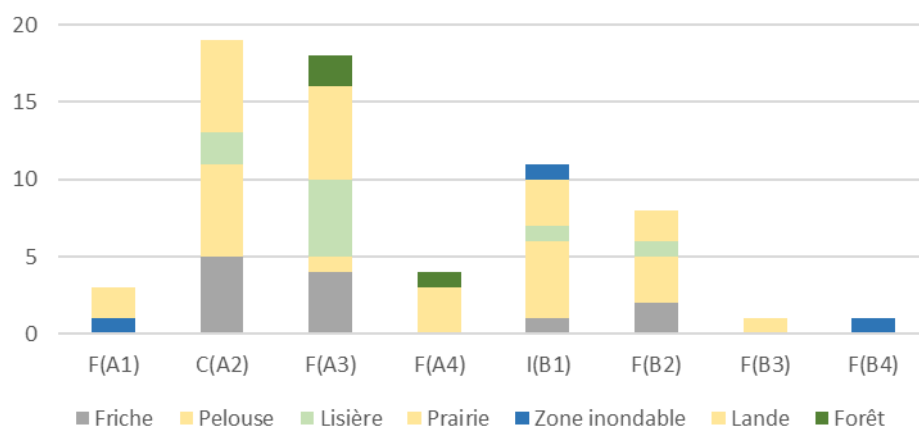
Annexe 26 : Espèces indicatrices par station avec liaison graphique

Type	Friche	Pelouse	Lisière	Prairie	Zone inondable	Lande	Forêt	Clarière	Total
F(A1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C(A2)	3	4	1	1	0	0	0	0	9
F(A3)	1	0	3	2	0	0	2	0	8
F(A4)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I(B1)	0	2	1	2	0	0	0	0	5
F(B2)	2	3	0	1	0	0	0	0	6
F(B3)	0	0	0	0	0	1	0	0	1
F(B4)	0	0	0	0	1	0	0	0	1

Annexe 27 : Espèces indicatrices par parc

Type	Friche	Pelouse	Lisière	Prairie	Zone inondable	Lande	Forêt	Clarière	Total	Lié avec (nbr)
F(A1)	0	0	0	0	1	2	0	0	3	4
C(A2)	5	6	2	6	0	0	0	0	19	4
F(A3)	4	1	5	6	0	0	2	0	18	7
F(A4)	0	0	0	0	0	3	1	0	4	6
I(B1)	1	5	1	3	1	0	0	0	11	7
F(B2)	2	3	1	1	0	1	0	0	8	6
F(B3)	0	0	0	0	0	1	0	0	1	9
F(B4)	0	0	0	0	1	0	0	0	1	8

Annexe 28 : Espèces indicatrices par parc avec liaison



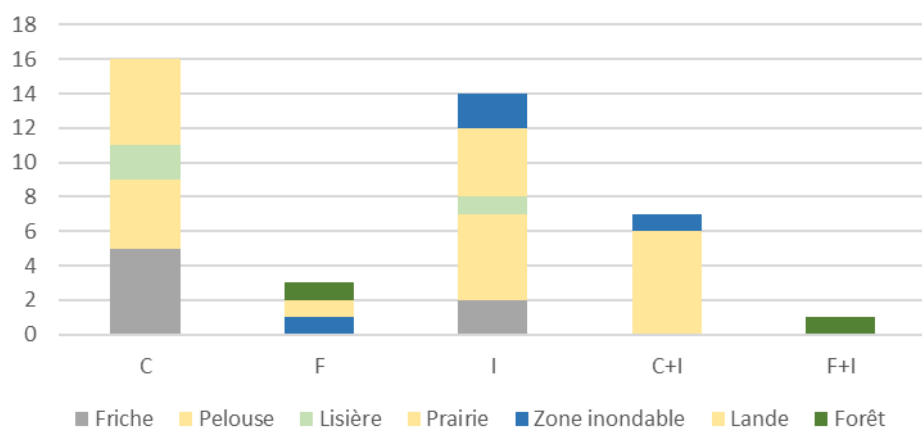
Annexe 29 : Espèces indicatrices par parc avec liaison graphique

Type	Friche	Pelouse	Lisière	Prairie	Zone inondable	Lande	Forêt	Total
C	5	8	2	7	1	0	0	23
F	0	0	0	0	1	1	2	4
I	2	9	1	6	3	0	1	22

Annexe 30 : Espèces indicatrices par milieu

Type	Friche	Pelouse	Lisière	Prairie	Zone inondable	Lande	Forêt	Total
C	5	4	2	5	0	0	0	16
F	0	0	0	0	1	1	1	3
I	2	5	1	4	2	0	0	14
C+I	0	4	0	2	1	0	0	7
F+I	0	0	0	0	0	0	1	1

Annexe 31 : Espèces indicatrices par milieu avec liaison



Annexe 32 : Espèces indicatrices par milieu avec liaison graphique

Directeur.rice de recherche :
Louison BIENVENU

Etudiante :
Emma DIDIER
PRI/DAE5
DAE/ADAGE
2024-2025

Effet d'héritage (Legacy Effect) des parcs photovoltaïques sur l'évolution d'espèces cibles et indicatrices : Évolution sur plusieurs années des espèces présentes initialement sur les sites

Résumé : Le Legacy Effect (LE), ou effet d'héritage, désigne l'influence durable des conditions initiales sur la dynamique écologique des écosystèmes. Ce concept inclut les impacts biotiques et abiotiques hérités d'écosystèmes passés, qui modifient la trajectoire de succession et la biodiversité du milieu actuel, même longtemps après la disparition de l'activité ou des espèces responsables.

Dans le cadre des parcs photovoltaïques, le LE pourrait permettre de mieux comprendre de quelle manière les caractéristiques du milieu d'origine influencent la biodiversité floristique de ces installations. Bien que ces parcs constituent une réponse efficace à la demande d'énergies vertes avec une faible empreinte carbone, leur implantation peut engendrer des perturbations significatives sur les sols et la flore.

Cette étude examine l'influence des milieux d'origine sur la composition floristique des parcs photovoltaïques, en analysant les espèces locales, exotiques, indicatrices et leurs traits fonctionnels. L'hypothèse propose que l'effet d'héritage soit initialement marqué mais diminue avec le temps en raison d'une homogénéisation floristique liée à la gestion. Les résultats permettront d'identifier les meilleurs sites d'implantations pour limiter leurs impacts sur la biodiversité.

Mots Clés : Legacy Effect (Effet d'héritage), Ecosystème, Succession écologique, Biodiversité floristique, Parcs photovoltaïques, Gestion écologique, Traits fonctionnels