



UNIVERSITÉ DE POITIERS

MASTER 2 STDV : STATISTIQUE ET DONNÉES DU VIVANT

RAPPORT DE STAGE :

Caractérisation statistique et spatiale de la pulvérisation de produits de protection des plantes en viticulture

Étudiant :

- Alexis BOURGUIGNON

Référent :

- M. Julien DAMBRINE

Tuteurs :

- M. Olivier NAUD
- M. Anice CHERAIET
- M. James TAYLOR

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'Avenir portant la référence ANR-16-CONV-0004

This work was supported by the French National Research Agency under the Investments for the Future Program, referred as ANR-16-CONV-0004 Les sujets de stage financés par #DigitAg sont affichés avec le label #DigitAg.



1 Mars 2022 — 31 Août 2022

1 Remerciements

J'adresse tout d'abord mes remerciements les plus sincères à mes encadrants **Olivier Naud, Anice Cheraïet** et **James Taylor** pour leur disponibilité, leurs conseils et la bienveillance dont ils ont fait preuve tout au long de mon stage. Ce fut un véritable plaisir de travailler ensemble, dans la confiance et la bonne humeur. Le fait de pouvoir être à l'aise et intégré aussi rapidement m'a permis d'apprécier ces 6 mois de stage, merci énormément à vous trois.

Mes remerciements vont évidemment à l'ensemble de mes collègues, pour tous les bons moments passés ensemble que ce soit au travail comme en dehors : **Sherif, Héloïse, Tom, Laurent, Zoé, Élodie, Victoria, Florent, Maude, Jules, Marc, Belal, Gaëlle** et évidemment **Daniel M.**

Merci aussi à l'ensemble des personnes de l'UMR ITAP pour leur bon accueil et sympathie : **Maxime, David, Gérard, Sébastien, Xavier R, Adrien, Ryad, Eric, Daphné, Silvia, Jean Philippe, Jean Luc, Jean François, Jean Paul** et toutes celles que je n'ai pas citées.

Je souhaite également remercier **Josiane Denis** (gestionnaire en ressources humaines) pour la rapidité et la qualité de ses réponses au niveau administratif, tout au long de mon stage.

Je remercie également toutes les personnes extérieures à l'UMR que j'ai pu rencontrer lors de ces 6 mois, qui elles aussi, m'ont très bien accueillies.

Je termine en remerciant l'**Université de Poitiers**, ainsi que tous ses enseignants et tout son personnel pour ces 5 années d'études qui m'apporteront énormément pour ma vie professionnelle.

Merci à toutes ces personnes qui ont permis de rendre mon stage si agréable !

Sommaire

1 Remerciements	2
2 Introduction	4
3 Présentation de l'Institut et de la structure d'accueil	5
4 Organisation du travail de l'étudiant dans son équipe	6
5 Présentation de la problématique scientifique et des questions scientifiques	7
5.1 Problématique	7
5.2 Questions scientifiques	8
6 Outils mathématiques	8
6.1 Outils d'économétrie spatiale	9
6.1.1 La fonction K de Ripley	9
6.1.2 La fonction M de Marcon et Puech	10
6.1.3 La fonction K Intertypes	11
6.1.4 La fonction M Intertypes	11
6.2 Outils de démécologie :	11
6.2.1 Mise à l'échelle multidimensionnelle non métrique (NMDS)	12
6.2.2 Test d'ANOSIM	12
6.2.3 Procédure Simper	13
6.2.4 Analyse des espèces indicatrices	13
7 Résultats et discussions	14
7.1 Présentation des données et mise en forme	14
7.2 Résultats	15
7.2.1 Informations générales	15
7.2.2 Densité Empirique	16
7.2.3 Répartition spatiale par niveaux de valeurs	18
7.2.4 Structuration spatiale des déciles de dépôts	21
7.2.5 Mise à l'échelle multidimensionnelle non métrique	23
8 Perspectives sur le plan scientifique	29
9 Conclusion	30
10 Conclusion personnelle	31
11 Bibliographie	32
12 Résumé	34
13 Abstract	35

2 Introduction

En agriculture, afin d'agir efficacement contre les maladies et les ravageurs, il est indispensable de réaliser correctement les traitements. Lorsque l'on a recours à des produits de protection des plantes (PPP, ou encore produits phytosanitaires), le principal enjeu est d'apporter le bon produit, avec la bonne dose au bon endroit et au bon moment contre la maladie ciblée. La réussite du traitement réside tout d'abord dans la maîtrise des réglages du pulvérisateur, mais aussi dans l'usage du matériel une fois au champ. En effet, le viticulteur doit intégrer le comportement de ses parcelles ainsi que leur historique (sensibilité des cépages aux maladies, sensibilité selon la situation pédoclimatique et géographique...). Il doit également évaluer les risques pour savoir quand effectuer une application de PPP, notamment en fonction des événements météorologiques passés et prévus.

Aujourd'hui, l'application de produits de protection des plantes par pulvérisation est une question majeure qui impacte les aspects agronomiques, environnementaux et économiques, d'un système cultural viticole. En effet, la viticulture, pour rester durable, doit satisfaire plusieurs exigences : économique, sanitaire, sociale et environnementale. Pour répondre à toutes ces exigences, la protection phytosanitaire est une condition indispensable et cette protection ne doit pas être réalisée de manière hasardeuse ou selon une fréquence systématique. La dose appliquée est généralement celle indiquée sur l'étiquette du PPP [1]. En effet, la densité foliaire, le stade phénologique et le type de pulvérisateur ne sont pas pris en compte pour définir la dose homologuée à pulvériser. Pourtant, selon le stade phénologique, la surface des feuilles peut être multipliée par dix et il existe un très grand choix de pulvérisateurs disponibles sur le marché qui ont des performances variables.

L'impact d'une machine sur l'environnement se mesure avant tout par sa capacité à réaliser un bon dépôt, c'est-à-dire à limiter les pertes, mais aussi à répartir le produit de façon homogène sur toute la surface foliaire à protéger avec des doses déposées adaptées. Vient alors l'objectif suivant : **éclairer la décision en pulvérisation des produits phytosanitaires au sein du couvert végétal pour protéger efficacement et rationnellement la vigne, en tenant compte de sa structure et du pulvérisateur utilisé.**

3 Présentation de l'Institut et de la structure d'accueil

L'Unité Mixte de Recherche ITAP (Information Technologies Analyse environnementale Procédés agricoles) de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), en cotutelle avec l'Institut Agro, a été créée en 1999.

L'UMR ITAP est spécialisée en Sciences pour l'Ingénieur appliquées à l'environnement et l'agriculture. Elle mène des recherches technologiques et méthodologiques appliquées à l'environnement et à l'agriculture. Elle a notamment des activités d'instrumentation et d'expérimentation au laboratoire comme sur le terrain, en modélisation et traitement du signal, et en évaluation des impacts environnementaux et sociaux des bio-procédés.

L'UMR est organisée en 4 axes de recherches :

- L'équipe ELSA (Évaluation Environnementale et Sociale) mobilise le cadre méthodologique de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) qui recense et quantifie, tout au long de la vie des produits, les flux physiques de matière et d'énergie associés aux activités humaines. Elle vise à concevoir dans une perspective cycle de vie et de durabilité forte des métriques et des indicateurs scientifiquement fondés pour accompagner la transition écologique des filières et des territoires.
- L'équipe DéMo (Décision et Modélisation agro-environnementale) s'inscrit dans le domaine de recherche de l'agriculture de précision et plus largement des méthodologies de l'agriculture numérique. L'équipe développe des méthodes de modélisation basées sur les géostatistiques, les systèmes dynamiques, et les méthodes d'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle. Elle s'intéresse notamment aux données spatiales et temporelles.
- L'équipe Comic (Capteurs Optiques pour les Milieux Complexes) cherche à caractériser les agro-écosystèmes en mettant au point des technologies de spectrométrie UV, visible et proche-infrarouge et d'imagerie multispectrale et hyperspectrale. Elle a une activité importante en chimiométrie.
- L'équipe PEPS (Procédés-Environnement-Pesticides-Santé) mène des travaux de recherche dans le domaine des procédés de protection des cultures, et notamment à propos des technologies de pulvérisation. Les objectifs principaux sont de :
 - Prévoir et prévenir les risques de dispersion de pesticides lors des applications
 - Évaluer et optimiser le fonctionnement des technologies
 - Limiter l'impact des procédés sur l'environnement et la santé

L'équipe développe également des travaux sur les alternatives à la pulvérisation et des technologies pour le biocontrôle.

L'UMR abrite également une unité mixte technologique (UMT ECOTECH) qui regroupe des personnels d'ITAP, et en particulier des personnels de l'équipe PEPS, ainsi que des personnels du CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes) et de l'IFV (Institut Français de la Vigne et du Vin).

Cette UMT vise à identifier, valider puis promouvoir les possibilités d'amélioration des techniques et des pratiques de pulvérisation ainsi que la conception de méthodes alternatives de protection des cultures. Ses principaux thèmes de travail actuels sont :

- L'évaluation des performances agro-environnementales des pulvérisateurs (qualité d'application, dérive)
- La modélisation des dépôts sur la végétation pour l'évolution de l'expression des doses et l'adaptation des doses aux caractéristiques de la végétation à protéger, du pulvérisateur, et du produit épandu
- Le développement de nouvelles méthodes comme la pulvérisation de précision (consistant à pulvériser un produit de protection de plante au bon endroit, au bon moment et en bonne quantité) et la conception de systèmes technologiques innovants pour des méthodes alternatives de protection des plantes et l'application du biocontrôle

Les travaux de ce stage s'inscrivent dans ceux de l'UMT ECOTECH. Ils ont été financés par l'Institut Convergences #DigitAg, et ont été encadrés par Olivier NAUD, Anice CHERAIET ainsi que James TAYLOR.

4 Organisation du travail de l'étudiant dans son équipe

J'ai été affecté au sein de l'équipe PEPS, constituée de 17 membres, pour effectuer mes travaux dans le contexte du programme en pulvérisation de précision de l'UMT ECOTECH. Mon stage s'effectuait avec un financement spécifique de #DigitAg. Pour me donner une vision de la pulvérisation de précision plus complète que celle liée à mon objet spécifique d'étude, j'ai été inclus dans l'équipe du projet BioSpraytech. Ce projet vise à utiliser la pulvérisation de précision pour étudier l'efficacité des produits de biocontrôle et préconiser les modes de pulvérisation adaptés selon le type de produit. J'ai été associé aux réunions de ce projet et à quelques travaux expérimentaux dans des thèmes proches. J'ai ainsi pu apporter mes compétences au projet et connaître les activités et résultats de l'équipe projet.

Le stage a débuté par de la lecture bibliographique. En effet, il était impératif de se renseigner sur le sujet, notamment sur le vocabulaire de l'agriculture ainsi que les problématiques de la pulvérisation de précision. J'ai principalement utilisé deux documents pour débiter: la thèse d'Anice CHERAIET [2] (soutenu en 2020) et le mémoire de stage de Ahmed Yacoub CHACH [3] (soutenu en 2021).

Après m'être imprégné du sujet, mes encadrants m'ont orienté vers de premiers objectifs et nous avons pu définir les premières pistes de recherches. Après un premier travail d'exploration, d'analyse et de visualisation des données selon ces orientations, j'ai pu aller ensuite vers une prise d'autonomie et un choix propre des outils mathématiques à utiliser.

Afin d'être régulièrement en contact avec les encadrants, nous organisons des réunions hebdomadaires. Ces réunions prenaient la forme d'une présentation orale, durant laquelle un bilan des travaux de la semaine était fait. Après une discussion critique collective des résultats, des propositions de pistes pour la suite de l'analyse étaient faites. Ce travail précis et focalisé était très complémentaire des réunions de projet, plus globales. De

plus, mensuellement se déroulait une réunion d'équipe PEPS, afin de discuter brièvement de l'avancée des travaux de chacun.

Après avoir atteint des résultats jugés suffisants, nous avons organisé une réunion de présentation auprès de l'ensemble de l'équipe PEPS et de l'UMT ECOTECH. Cela a permis de répondre à certaines interrogations sur la distribution et la répartition des dépôts ainsi que de proposer une critique constructive du protocole d'échantillonnage usuel de l'équipe.

5 Présentation de la problématique scientifique et des questions scientifiques

5.1 Problématique

Les techniques agricoles sont aujourd'hui en continuelle évolution, avec des recherches qui se portent essentiellement sur la pulvérisation de précision. Les avantages d'une pulvérisation de précision sont nombreux, notamment dans le but de réduire les quantités de produits phytosanitaires et les effets négatifs sur l'environnement. Pour réaliser de la pulvérisation de précision, il est indispensable de comprendre comment se comporte le PPP une fois pulvérisé par les machines agricoles. Il est donc nécessaire d'être capable de caractériser la distribution et la répartition des dépôts de PPP au sein de la vigne et à différentes échelles. Cela nous permettra ensuite d'agir en conséquence et de modifier si nécessaire les méthodes de pulvérisation. On souhaite pour cela déterminer des indicateurs statistiques relatifs aux distributions des quantités déposées (fonction de densité, moyenne, médiane, etc) et de leurs répartitions spatiales.

Nous pouvons formuler notre problématique générale : **comment déterminer et intégrer l'information statistique et spatiale pour permettre une adaptation de la quantité de pulvérisation de produits de protection des plantes ?**

L'UMT ECOTECH a développé et mis en œuvre une méthode d'échantillonnage des dépôts sur vigne réelle. En effet, l'UMT a créé un système de mailles pour disposer des collecteurs dans la végétation. En 2016, il était appliqué des mailles de 20 cm de haut et 10 cm de profondeur, remplacé en 2017, par des mailles de 40 cm de haut et 10 cm de profondeur [4]. Un collecteur en PVC est placé au sein de chaque maille. Ce collecteur est plié sur la feuille de façon à collecter le dépôt des deux côtés de la feuille (dimensions 0,04 x 0,05m une fois plié).

Les questions opérationnelles qui se posaient au début de mon stage étaient les suivantes :

- Est-ce qu'avec ce protocole, on peut estimer les distributions de dépôt de PPP sur l'ensemble de la surface des feuilles ?
- Que peut-on dire de la structure spatiale des dépôts en lien avec la distribution statistique ?

5.2 Questions scientifiques

Pour préciser la problématique, nous pouvons formuler plusieurs questions scientifiques qui seront abordées au cours du rapport :

- Quels indicateurs choisir pour caractériser la distribution et la répartition des dépôts de pulvérisation interceptés dans la végétation ?
- Comment interpréter cette distribution et cette répartition du point de vue de la protection phytosanitaire ?
- Quelle précision est conservée pour caractériser les dépôts lors d'une dégradation de la qualité d'échantillonnage (diminution du nombre de collecteurs) ?
- À quel niveau d'agrégation de la distribution des dépôts (choix de quantile), l'échantillonnage usuel réalisé par l'UMT ECOTECH est interprétable et représentatif de la réalité ?

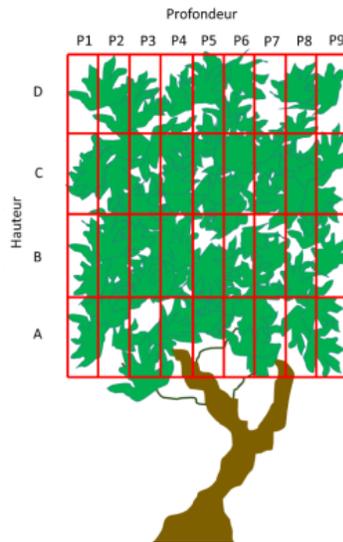


Figure 1: Représentation en vue de profil d'une section de végétation et du maillage utilisé. Quatre classes de hauteur (A - D) et neuf classes en profondeur (P1 - P9)

Ce maillage a été utilisé lors de l'expérimentation de 2018 qui a été le principal support de notre étude. Lors des autres années d'expérimentation, le maillage était analogue (unités d'échantillonnage de 40 cm de haut par 10 cm de profondeur) mais avec moins de niveaux de profondeur. Ici, la quantité de végétation est importante

6 Outils mathématiques

Pour répondre aux objectifs que nous nous sommes fixés, nous avons principalement utilisé des outils d'économétrie et d'écologie des populations [5] :

- L'économétrie spatiale est un domaine scientifique combinant plusieurs disciplines dont les statistiques, l'économie, notamment l'économie régionale et urbaine, ainsi que les sciences sociales, avec l'analyse spatiale. Elle permet de mener des études sur les relations spatiales affectant des données statistiques sur des territoires de tailles variables. On peut par exemple étudier les relations spatiales entre pharmacies et cabinets médicaux, ou les relations entre proies et prédateurs dans un milieu naturel.
- L'écologie des populations est l'étude des effectifs des populations et des méta-populations, et plus particulièrement leur évolution et leur répartition. Classiquement, pour caractériser l'interaction spatiale entre des individus, on s'intéresse à leur nature (espèce animale, espèce bactérienne...) puis on analyse leur abondance dans une zone géographique. Dans notre cas, nous choisissons d'étudier les dépôts comme plusieurs populations d'individus. Comme les dépôts ne diffèrent pas véritablement par leur nature (1 seul type de PPP pulvérisé), nous avons choisi d'appliquer cette analyse en séparant les populations suivant leurs gammes de valeurs (quantiles).

Nous avons seulement utilisé quelques outils d'économétrie qui sont les **fonctions d'étude de populations**, pour comprendre comment interagissent spatialement une population de mesures de dépôts catégorisées par son niveau dans une distribution (quartile, décile) en fonction d'une autre population de dépôts. Il a également été utilisé un outil d'écologie des populations qui est la **mise à l'échelle multidimensionnelle non métrique**, dans un objectif de déterminer les zones du couvert végétal les mieux ou les moins bien protégés par le PPP. Ces deux domaines ont été sélectionnés par l'intérêt des outils statistiques qu'ils proposent et par leur complémentarité. En effet, ces derniers vont nous permettre dans la section suivante de caractériser la distribution, la répartition et la structuration des dépôts, tout en déterminant à quelle précision et quel niveau d'agrégation de la distribution des dépôts l'échantillonnage d'ECOTECH est interprétable et représentatif de la réalité.

6.1 Outils d'économétrie spatiale

Lors de l'analyse d'une distribution, deux phénomènes peuvent être observés : soit les points sont distribués au hasard, soit ils présentent une interaction. Dans ce dernier cas, l'interaction peut soit être agrégative soit répulsive.

- Une distribution au hasard est une configuration complètement aléatoire, c'est-à-dire que les points sont localisés partout avec une probabilité égale et indépendamment les uns des autres.
- Une distribution « répulsive » est une configuration où les points sont plus régulièrement espacés qu'ils ne le sont dans une configuration complètement aléatoire.
- Une distribution « agrégée » est une configuration où les points sont plus concentrés géographiquement que dans une configuration complètement aléatoire : on observe des agrégats.

6.1.1 La fonction K de Ripley

L'indicateur le plus utilisé pour appréhender la corrélation dans les processus ponctuels est la fonction empirique \hat{K} , proposée par B.D. Ripley en 1976[6].

La fonction K permet d'estimer le nombre moyen de voisins rapporté à l'intensité, c'est une fonction cumulative, utilisable uniquement dans **un processus homogène**. Elle permet d'étudier des configurations de points de types semblables.

Son estimateur est défini ainsi :

$$\hat{K}(r) = \frac{|W|}{n(n-1)} \sum_i \sum_{j \neq i} \mathbb{1}[\|x_i - x_j\| \leq r] c(x_i, x_j, r)$$

où W est l'aire d'étude, n est le nombre total de points sur la fenêtre d'observation, x est une observation, r est le rayon d'observation et $c(x_i, x_j, r)$ correspond à la correction des effets de bord.

L'estimateur procède en trois points :

- L'estimateur décompte le nombre de voisins de chaque point localisés dans un disque de rayon r .
- L'estimateur calcule le nombre moyen de voisins $\forall r$
- L'estimateur compare ces résultats à ceux d'une distribution homogène (processus de Poisson homogène).

En voici trois exemples, avec en rouge la fonction théorique d'un processus de Poisson homogène et en noir la fonction estimée.

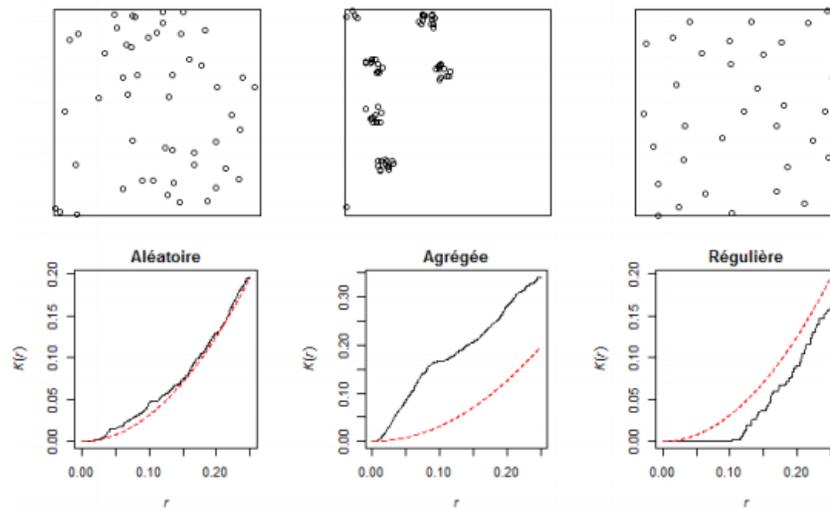


Figure 2: La fonction K de Ripley dans les trois configurations

6.1.2 La fonction M de Marcon et Puech

Dans un cas, où l'hypothèse d'homogénéité n'est pas validée, il est possible d'utiliser une autre fonction, la fonction M de Marcon et Puech qui est également une fonction cumulative, qui va comparer la proportion de points dans une zone locale à l'ensemble des points dans la zone globale :

$$\hat{M}(r) = \sum_{i \in S} \frac{\sum_{j \neq i, j \in S} \mathbb{1}[|x_i - x_j| \leq r]}{\sum_{j \neq i} \mathbb{1}[|x_i - x_j| \leq r]} / \frac{n_S - 1}{n - 1}$$

où n_S désigne le nombre de points total du type S et n le nombre de point total.

La fonction va comparer la moyenne locale du nombre de points de type S (en fonction d'un rayon r) autour des points de type S au nombre de points de type S sur la globalité de l'espace géographique.

6.1.3 La fonction K Intertypes

Les fonctions intertypes permettent d'étudier des configurations de points de types différents (contrairement à la fonction K de Ripley qui ne permet d'étudier qu'un seul type unique de points).

On définit la fonction K intertypes comme suit :

$$\hat{K}_{S,T}(r) = \frac{1}{\lambda_S n_S} \sum_{i \in S} \sum_{j \in T} \mathbb{1}[|x_i - x_j| \leq r]$$

où $\hat{\lambda}_S$ désigne l'intensité estimée du sous-processus de type S et n_S représente le nombre total de points S.

Remarque : dans le cas, où le type S est le même que le type T, on obtient la définition de la fonction K de Ripley vu précédemment.

6.1.4 La fonction M Intertypes

À nouveau, en cas d'un espace non homogène, on applique la fonction M intertype.

Défini ainsi :

$$\hat{M}_{S,T}(r) = \sum_{i \in S} \frac{\sum_{j \in T} \mathbb{1}[|x_i - x_j| \leq r]}{\sum_{j \neq i} \mathbb{1}[|x_i - x_j| \leq r]} / \frac{n_T}{n - 1}$$

où n désigne le nombre total de points et n_T le nombre de points de type T.

C'est cette fonction que l'on utilisera essentiellement dans la partie suivante. Nous comparerons la proportion locale de voisins du type T (appelé groupe observé) autour de points du type S (appelé groupe référence) à la proportion globale observée sur tout le territoire considéré.

6.2 Outils de démécologie :

La démécologie (écologie des populations) est l'étude des dèmes (population au sens animal) et des peuplements en relation avec leur environnement, de façon à expliquer les variations de leurs effectifs. La démécologie étudie donc l'évolution et la répartition de ces populations.

6.2.1 Mise à l'échelle multidimensionnelle non métrique (NMDS)

La mise à l'échelle multidimensionnelle [7] non métrique (NMDS, *Non-metric multidimensional scaling*) est une approche d'analyse de gradient indirecte qui produit une ordination basée sur une distance ou une matrice de dissemblance. La méthode NMDS tente de représenter la dissemblance par paires entre les objets dans un espace de faible dimension.

C'est une technique itérative et non paramétrique. Contrairement à l'analyse en composantes principales (ACP), la méthode NMDS n'utilise pas la distance euclidienne pour caractériser la distance entre deux points dans l'espace multivarié de leurs attributs. Elle utilise pour l'ordination une matrice de rang obtenue à partir de la matrice de dissemblance. Pour mesurer la qualité de l'ajustement du NMDS, un « stress » est généré. Avec un stress supérieur à 0.2, il est considéré que l'ordination est « suspecte » tandis qu'avec un stress inférieur à 0.1, l'ordination est considérée comme acceptable.

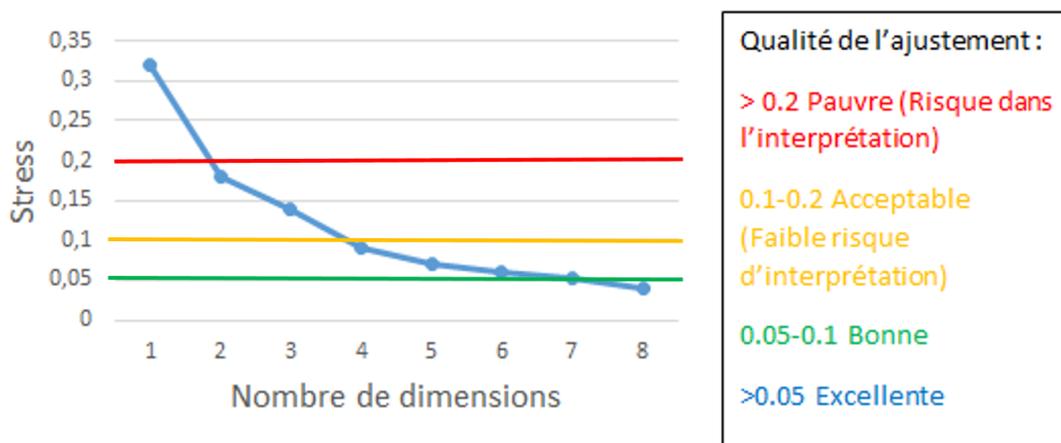


Figure 3: Exemple de l'évolution du stress en fonction du nombre de dimensions

Afin d'interpréter les résultats d'une NMDS, il est impératif d'utiliser différents tests statistiques.

6.2.2 Test d'ANOSIM

Le test d'ANOSIM [8] (analyse des similitudes, *analysis of similarities*) est similaire à un test d'hypothèse d'ANOVA, mais avec une matrice de dissemblance en entrée. C'est un test non paramétrique, il permet de déterminer si les différences entre plusieurs groupes sont significatives. On obtient en sortie une valeur $R = \frac{r_B - r_W}{M/2}$ où r_B et r_W représentent les moyennes des valeurs de rang des similarités calculées entre les groupes d'échantillons et à l'intérieur de chaque groupe et $M = n(n-1)/2$ où n est le nombre d'échantillons. R varie entre 0 et 1. Plus la valeur R est proche de «1» plus une dissemblance entre les groupes semble exister tandis qu'une valeur R proche de «0» suggère une similitude entre les groupes.

6.2.3 Procédure Simper

La procédure de répartition des pourcentages de similitudes (SIMPER) a pour but d'évaluer la contribution moyenne en pourcentage des variables à la dissemblance entre deux groupes. Cela permet donc de déterminer les variables qui contribuent à la différence entre plusieurs groupes (identifiés par un test d'ANOSIM, par exemple). Pour évaluer cette contribution, on utilise la distance de Bray-Curtis. Voici l'équation permettant le calcul de la distance de Bray-Curtis : ici, deux échantillons j et k sont comparés

$$BC_{jk} = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^p \min(N_{ij}, N_{ik})}{\sum_{i=1}^p (N_{ij} + N_{ik})}$$

avec N_{ij} l'abondance d'une espèce i dans l'échantillon j et N_{ik} l'abondance de la même espèce i dans l'échantillon k.

6.2.4 Analyse des espèces indicatrices

L'analyse des espèces indicatrices permet d'identifier les espèces microbiennes que l'on trouve plus souvent dans un groupe de traitement que dans un autre. Une espèce indicatrice est définie comme suit : « **Espèce dont le statut fournit des informations sur l'état général de l'écosystème et des autres espèces de cet écosystème. Ils reflètent la qualité et les changements dans les conditions environnementales ainsi que les aspects de la composition de la communauté.** - Programme des Nations Unies pour l'environnement (1996). La valeur statistique de la fonction « r.g » dans le test des espèces indicatrices est un « coefficient de corrélation bisériel ponctuel » [9], qui mesure la corrélation entre deux vecteurs binaires.

$$r_{pbis}(i) = \frac{m_1 - m_0}{\sigma} * \sqrt{p(1-p)}$$

avec m_1 la moyenne des données classées dans le groupe 1, m_0 la moyenne des données classées dans le groupe 0, σ l'écart type du jeu de données.

Dans la partie suivante, nous allons appliquer ces outils, en commençant par la caractérisation de la distribution et de la répartition spatiale des dépôts à l'aide des outils d'économétrie spatiale, nous observerons plusieurs phénomènes statistiques et agronomiques (conservation de la moyenne de dépôt selon les protocoles, dilution du PPP au sein de la végétation...), tandis qu'avec les outils de démécologie nous étudierons la structuration de ces derniers et constaterons des pertes de structuration et de précision des dépôts selon les protocoles d'échantillonnage.

7 Résultats et discussions

7.1 Présentation des données et mise en forme

Pour appliquer les outils mathématiques présentés précédemment, il a été utilisé un jeu de données de 2018 qui a été obtenu par une expérience réalisée sur une parcelle de cépage « *Vitis vinifera* L. cv Caladoc » dans un vignoble caractéristique du sud de la France. Cette placette a été découpée en douze sections de végétation jugées homogènes et un maillage (quatre hauteurs et neuf profondeurs) a été appliqué au sein de chacune d'entre elles. Il a ensuite été choisi de positionner 3 collecteurs artificiels par maille sur six de ces sections et de prélever des feuilles sur les autres sections (que l'on nommera disques foliaires). Il a ensuite été pulvérisé un traceur colorimétrique en phase aqueuse (tartrazine) et chaque collecteur et disque foliaire ont ensuite été prélevés et placés dans des sacs individuels afin de les analyser en laboratoire et d'obtenir le dépôt pulvérisé sur chacun d'entre eux.

Le jeu de données final est donc constitué de huit variables (quatre qualitatives et quatre quantitatives) pour un total de 2258 observations.

Les variables qualitatives nous informent sur :

- Les modalités de la manipulation (Collecteurs artificiels ou Disques foliaires).
- Le numéro de la section concernée (1 à 6).
- La hauteur de la maille concernée (A à D).
- La profondeur de la maille concernée (1 à 9).

Les variables quantitatives nous informent sur :

- Le nombre de collecteurs ou de disques artificiels au sein de la maille.
- La quantité de dépôt sur le dessus de la feuille.
- La quantité de dépôt sur le dessous de la feuille.
- La moyenne de dépôt des deux côtés de la feuille.

Pour compléter ce jeu de données, deux nouvelles colonnes sont créées pour obtenir une hauteur et une épaisseur aléatoire à chaque observation au sein de leur maille propre, puisqu'il n'est pas possible de géolocaliser le véritable emplacement des points. Ces colonnes permettront d'obtenir des résultats plus réalistes qu'avec un choix de positionnement central.

Une dernière colonne est créée pour attribuer une valeur entre 1 et 10 aux observations, cette valeur va représenter l'appartenance de chaque point aux déciles de dépôts.

Manip	N_section	Hauteur	Profondeur	Dépôt inf	Dépôt sup	Dépôt total	H	P	Décile
DF	3	B	5	12,2	18,7	15,5	2,30	5,13	1
DF	3	D	6	17,1	17,9	17,5	4,64	6,08	1
DF	2	B	6	35,0	26,8	30,9	2,21	6,35	1
DF	5	D	8	NA	NA	31,3	4,93	8,05	1

Table 1: Premières lignes du jeu de données

7.2 Résultats

7.2.1 Informations générales

Débutons l'analyse en présentant quelques statistiques descriptives des valeurs de dépôts selon la méthode d'échantillonnage :

Sommaire des dépôts						
Type d'échantillonnage	Minimum	1er quartile	Médiane	Moyenne	3e quartile	Maximum
Disques foliaires	15,46	97,63	182,03	234,69	321,15	1204,05
Collecteurs artificiels	23,17	116,07	198,84	231,01	332,08	686,92

Table 2: Statistiques descriptives des dépôts selon le type d'échantillonnage

Cette figure montre une étendue de valeurs bien plus importante concernant les disques foliaires. En effet, ces derniers semblent collecter de plus faibles et plus forts dépôts que les collecteurs artificiels, cependant les moyennes sont semblables entre les deux types d'échantillonnage. On note également que les niveaux du 1er quartile et 3ème quartile sont proches.

Pour une comparaison plus visuelle, affichons la boîte à moustache de chacun, ce qui nous permettra de conclure de la même façon que précédemment :

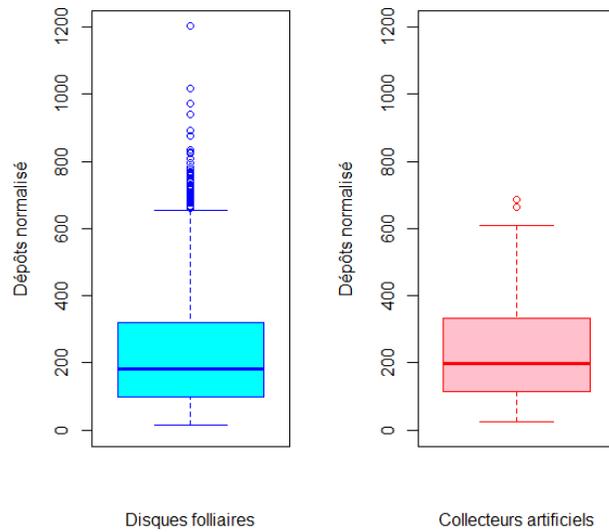


Figure 4: Box plots des dépôts de PPP selon le type d'échantillonnage

7.2.2 Densité Empirique

Poursuivons l'analyse en étudiant la densité empirique des dépôts (des deux côtés de la feuille).

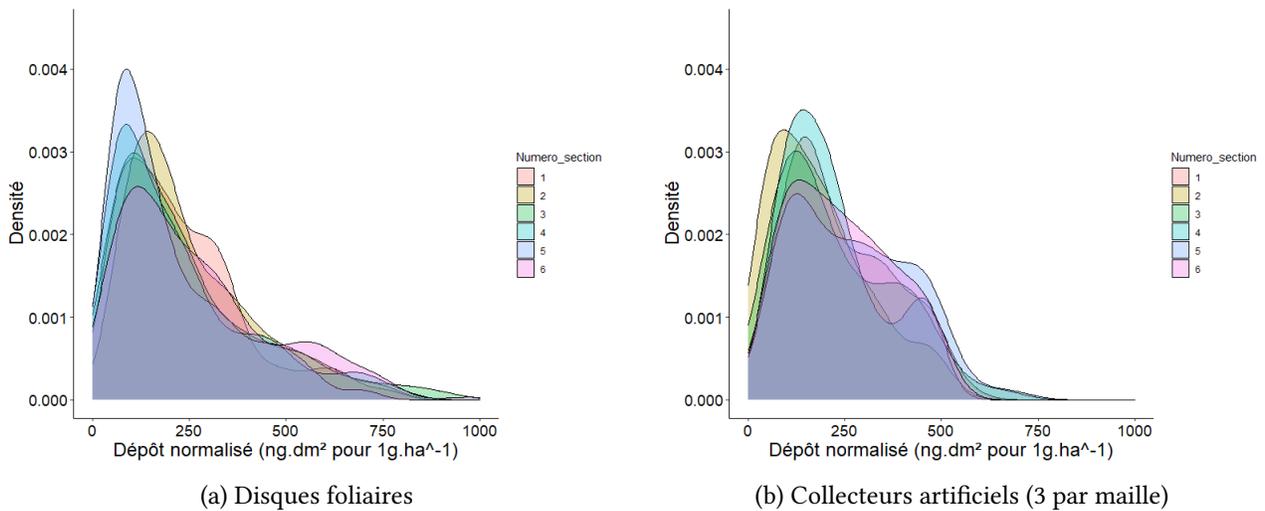


Figure 5: Courbes de densités empiriques des valeurs de dépôt en fonction de la section de végétation considérée.

Les deux figures ci-dessus présentent les courbes de densités empiriques des dépôts selon leurs sections et leur type d'échantillonnage. Le test de Kolmogorov Smirnov nous permet de conclure que les courbes de densité suivent une loi de Poisson (au seuil $\alpha=0.05$). On observe à nouveau une variabilité plus élevée pour les disques foliaires, des valeurs de dépôts plus importantes ont été prélevées sur les feuilles que sur les collecteurs en PVC. Tout comme des plus faibles dépôts qui sont aussi prélevés sur les disques foliaires.

Intéressons-nous maintenant aux courbes de densité des dépôts avec le protocole d'ECOTECH (un collecteur par maille) :

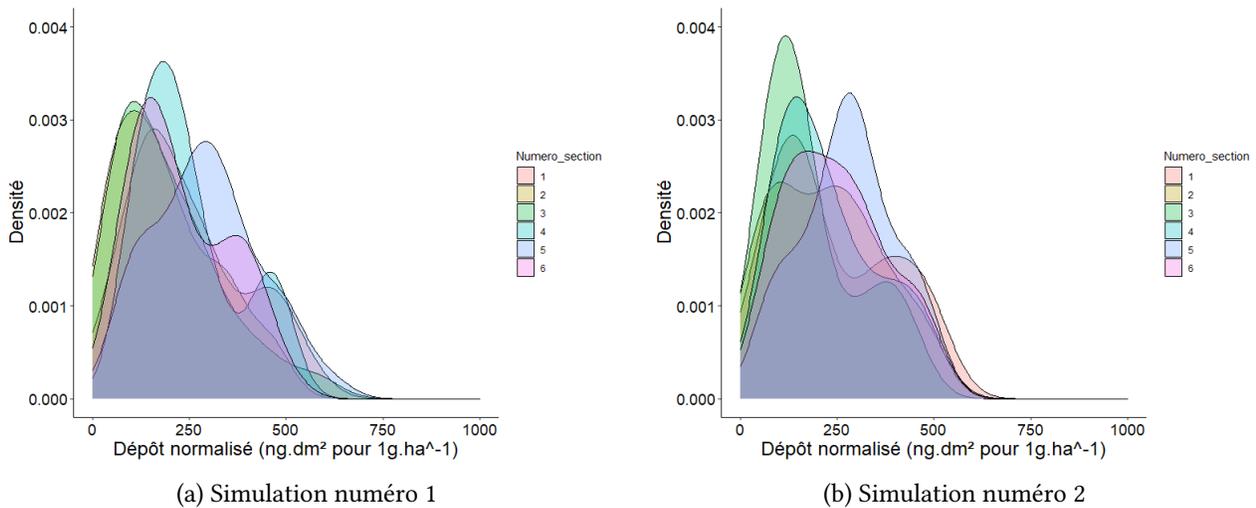


Figure 6: Simulations de courbes de densité empiriques des dépôts en fonction de la section de végétation considérée sur les collecteurs artificiels en suivant le protocole ECOTECH

Après avoir généré plusieurs tirages aléatoires d'un collecteur dans chaque maille de section (soit un prélèvement de 216 collecteurs), on trace les courbes de densités empiriques. Nous pouvons remarquer que les courbes de densités ont tendance à se différencier d'une simulation à l'autre et que certaines sections suivent des lois différentes dans certaines simulation. On comprend donc que le protocole d'ECOTECH ne représente pas de manière fiable la quantité de dépôts réellement distribuée.

Pour poursuivre l'étude de cette distribution, intéressons nous à la zone où la surface foliaire est la plus élevée, c'est à dire au centre du maillage (que l'on définit par les profondeurs 4, 5 et 6), c'est ici où la quantité de feuilles est la plus importante et que l'on retrouve les plus faibles dépôts.

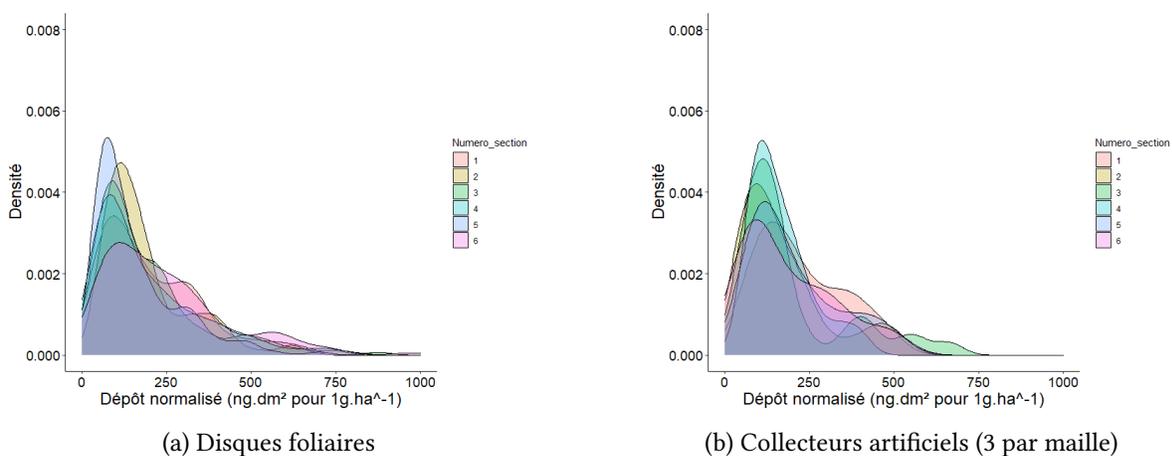


Figure 7: Courbes de densité empiriques des valeurs de dépôt en fonction de la section de végétation considérée.

On observe à nouveau des densités suivant la même loi que pour l'ensemble du maillage, à nouveau, l'échantillonnage par disques foliaires collecte plus de forts dépôts, néanmoins, l'échantillonnage par collecteurs artificiels semble collecter plus de dépôts moyens (aux alentours de 400 ng.dm² pour 1g.ha⁻¹).

Observons la même zone en appliquant le protocole ECOTECH. Pour rappel, cela consiste à prélever uniquement un collecteur par maille de chaque section.

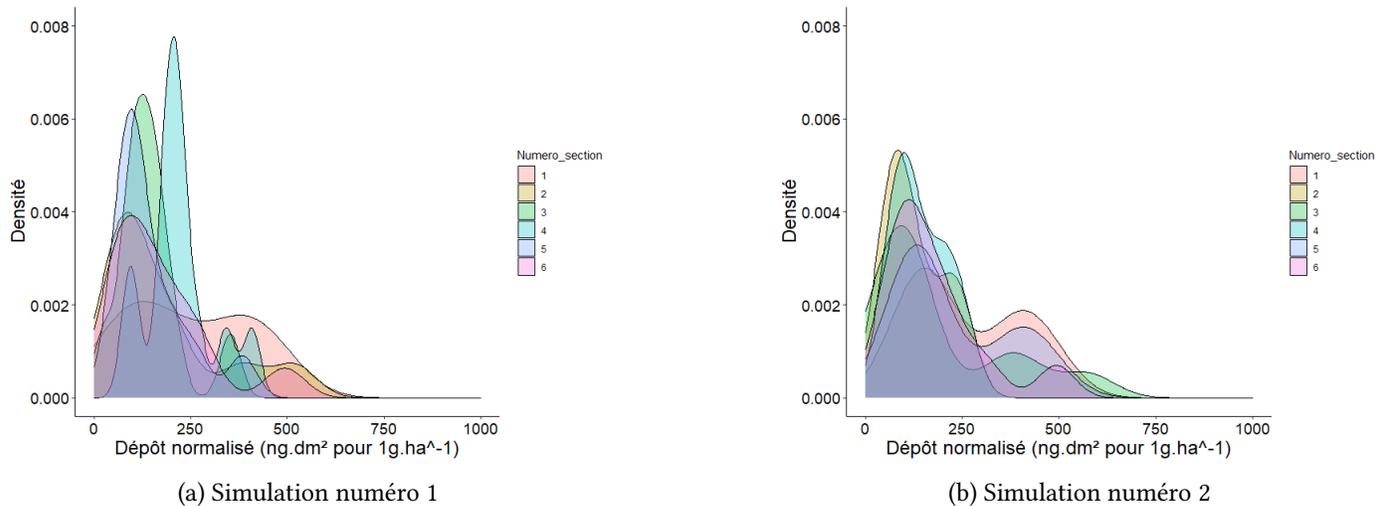


Figure 8: Simulation de courbes de densité empiriques des valeurs de dépôt en fonction de la section de végétation considérée avec le protocole ECOTECH

Les courbes de densité sont très différentes entre nos simulations que ce soit pour les faibles, moyens et grands dépôts (très peu échantillonnés). Le centre du maillage présente une très importante variabilité avec ce protocole, ceci renforce notre constat précédent qu'une distribution avec un collecteur par maille ne représente pas la distribution réelle des dépôts. Ces différences s'expliquent par l'importante surface foliaire dans le centre de la végétation et donc la difficulté du traceur à atteindre cette zone.

Avec un découpage en maille de ce type et au vu de la forme des distributions et de la dispersion des dépôts, nous en concluons qu'un indicateur statistique « classique » (moyenne/médiane/étendue...) n'est pas suffisant pour caractériser efficacement nos dépôts de PPP. Il est donc nécessaire d'ajouter la localisation spatiale des dépôts dans cette caractérisation.

7.2.3 Répartition spatiale par niveaux de valeurs

Étudions donc la répartition spatiale des dépôts, nous choisissons de découper les dépôts en déciles. Pour la visualisation, nous avons choisi de regrouper les déciles qui ont un comportement semblable. Nous avons déterminé trois groupes :

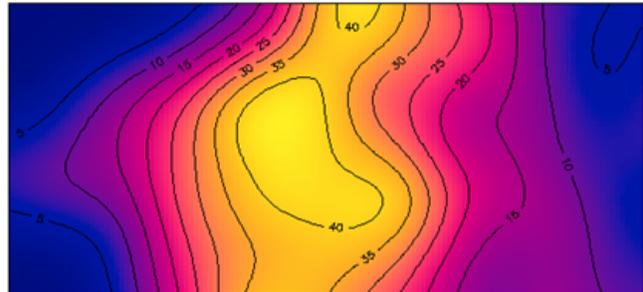
- Groupe 1 de faibles déciles (du 1er au 4e décile)
- Groupe 2 de déciles intermédiaires (du 5e au 8e décile)

- Groupe 3 de forts déciles (du 9e au 10e décile)

Pour les 3 groupes, nous ferons la comparaison avec les trois types d'échantillonnage.

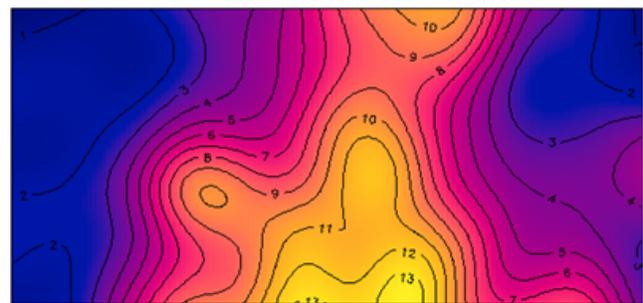
Débutons avec le groupe des faibles déciles :

Les faibles déciles se situent en très grande partie dans les profondeurs centrales et à toutes les hauteurs. On observe également leur très faible présence sur les contours du maillage. De plus, on peut remarquer un phénomène de croissance/décroissance stricte de la répartition des déciles selon la zone d'observation.



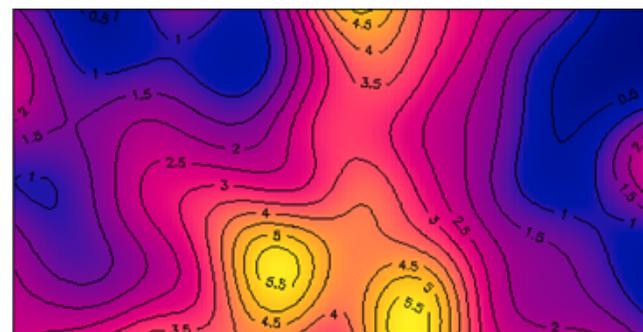
(a) Disques foliaires

Concernant les collecteurs artificiels, les faibles déciles semblent se positionner de façon légèrement plus homogène, néanmoins il y a toujours une présence plus importante dans le centre du maillage.



(b) Collecteurs artificiels

Enfin, avec le protocole Ecotech, la figure montre une nouvelle fois cette forte présence au centre de la maille, avec à nouveau une répartition plus homogène qu'avec les disques foliaires ainsi qu'un nombre plus important aux surfaces externes des hauteurs.



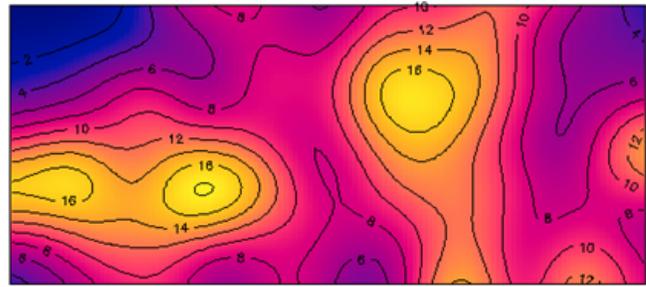
(c) Simulation protocole ECOTECH

Figure 9: Répartitions spatiales des faibles dépôts par estimation du noyau à bande passante fixe selon le type d'échantillonnage

On peut donc conclure que l'on conserve la répartition spatiale avec le protocole, cependant une perte de précision se fait ressentir. Avec le protocole Ecotech, on tend à avoir une vision exagérément homogène de la répartition des déciles dans l'espace du couvert.

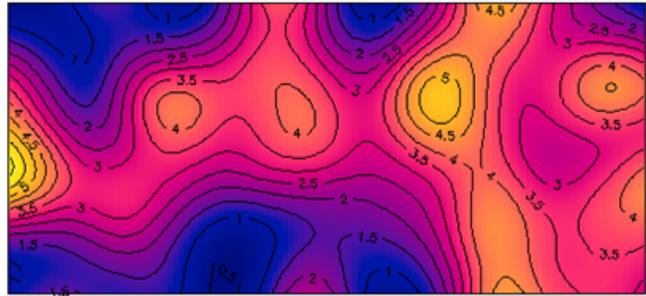
Réalisons la même analyse pour le groupe des forts dépôts :

En collectant les dépôts par des disques foliaires, nous observons que le groupe de forts déciles a tendance à se répartir dans l'ensemble du maillage, mais en atteignant très peu le centre.



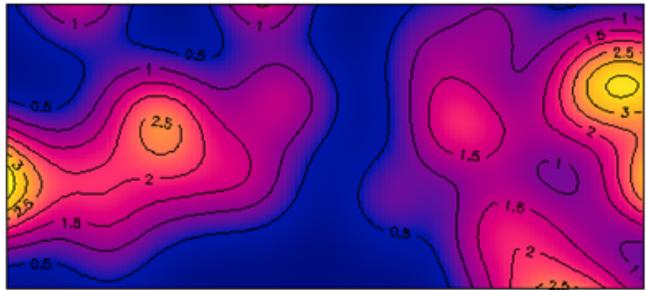
(a) Disques foliaires

Avec les collecteurs artificiels, la répartition des forts déciles semble se répartir de façon plus homogène dans toutes les profondeurs, avec néanmoins une présence plus faible dans les hauteurs basses du maillage.



(b) Collecteurs artificiels

Enfin, avec le protocole ECOTECH, on se rapproche assez bien du cas avec les disques artificiels, les grands déciles sont très peu présents au centre du maillage mais apparaissent en forte quantité sur les surfaces externes.



(c) Simulation protocole ECOTECH

Figure 10: Répartition spatiale des forts dépôts par estimation du noyau à bande passante fixe selon le type d'échantillonnage

À l'échelle de résolution de la maille, la répartition des dépôts est très variable, cependant, on arrive à distinguer des zones de répartition avec des déciles de dépôts plus faibles vers le centre de la végétation, où la surface foliaire est la plus importante. Cela montre un effet de dilution de la pulvérisation dans le couvert végétal, moins de PPP au centre que sur les surfaces externes. Cela peut s'expliquer par différents paramètres : trajectoire de la pulvérisation et variation de l'angle d'incidence suivant le réglage (buses hautes et basse notamment), variation de la densité foliaire (plus de densité au centre de la végétation), distribution anisotrope de la surface foliaire, disposition des feuilles par rapport au flux d'air, aérodynamique à petite échelle des gouttelettes de pulvérisation près des surfaces des collecteurs.

7.2.4 Structuration spatiale des déciles de dépôts

Dans cette partie, intéressons-nous à la structuration des déciles à l'aide des fonctions présentées dans la partie Outils d'économétrie spatiale, on utilisera la fonction "Mveloppe" du package "spatstat" sur R pour l'ensemble de l'analyse sur l'ensemble de cette partie.

On rappelle que trois cas de structuration sont observables : une configuration aléatoire, une configuration d'agrégation ou alors une configuration régulière (points dispersés). Afin de déterminer quand une configuration peut être considérée comme statistiquement aléatoire, ajoutons une enveloppe de confiance. Lorsque la courbe de la fonction M est à l'intérieur de l'enveloppe, la configuration peut être considérée comme aléatoire.

On va s'intéresser au groupe des faibles déciles, pour connaître sa structuration par rapport aux trois groupes. Pour cela, on place en référence le groupe des faibles déciles et on observe les trois groupes en référence.

On rappelle que la variable r correspond au rayon d'observation de notre zone spatiale d'analyse.

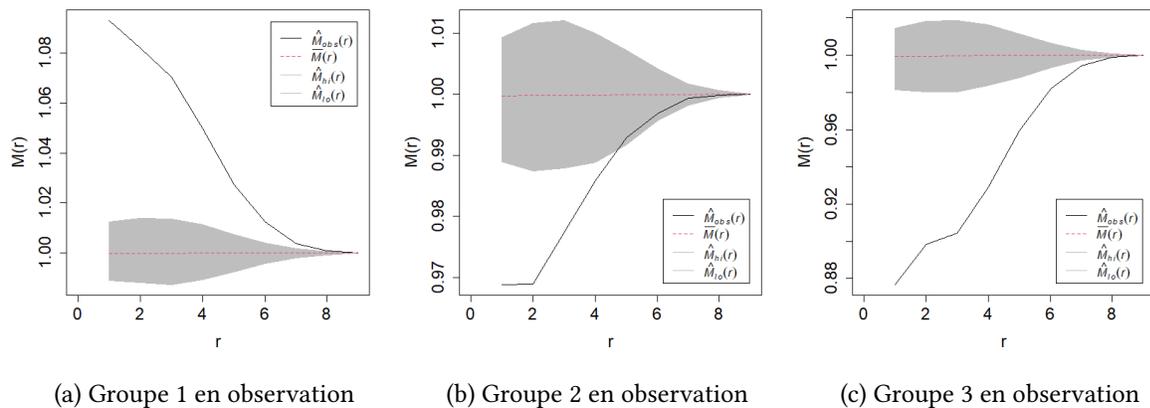


Figure 11: Structuration du groupe des 4 premiers déciles avec des disques foliaires vis à vis des trois groupes en observation

On peut observer que les déciles du groupe 1 sont agglomérés autour de ce même groupe, cela signifie qu'on trouve de faibles dépôts autour de faibles dépôts ($\forall r$). Tandis qu'on observe que les deux autres groupes ont tendance à se disperser par rapport au groupe 1. ($\forall r < 6$ pour le groupe 2 et $\forall r$ pour le groupe 3).

Poursuivons, en utilisant le protocole des collecteurs artificiels.

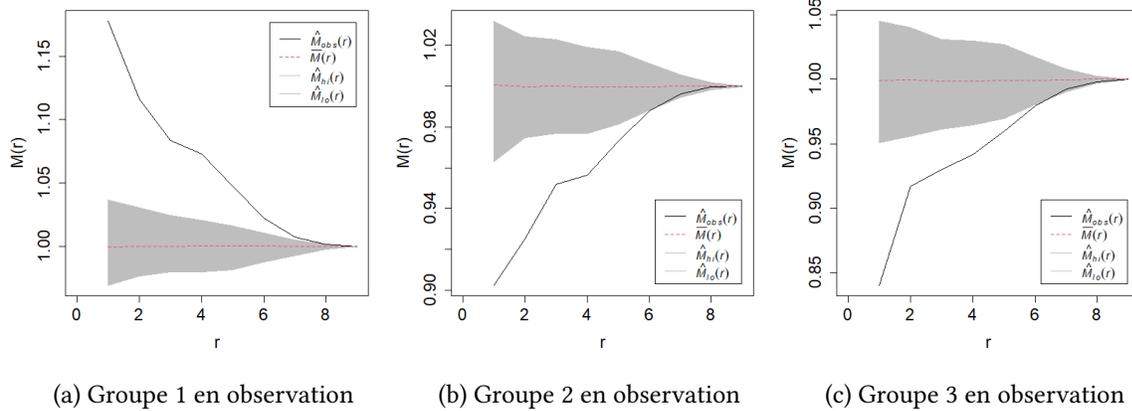


Figure 12: Structuration du groupe des 4 premiers déciles avec des collecteurs artificiels vis à vis des trois groupes en observation

On observe pratiquement les mêmes structurations qu’avec les disques foliaires, la seule différence concerne le groupe 3, avec une configuration aléatoire $\forall r > 6$.

On termine ainsi cette partie, en étudiant la configuration avec le protocole ECOTECH

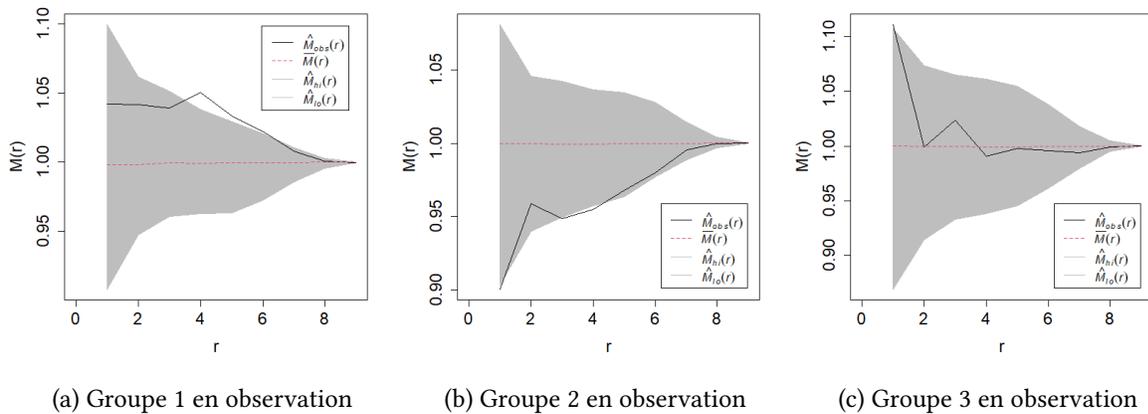


Figure 13: Structuration du groupe des 4 premiers déciles avec le protocole ECOTECH vis à vis des trois groupes en observation

Ces résultats permettent de conclure que le protocole ECOTECH ne conserve pas la structuration obtenue sur feuille réelle. En effet, sur nos figures, on peut observer que pour presque l’ensemble des valeurs de r , nos configurations sont considérées comme aléatoires.

Ainsi, après l’étude de l’ensemble des cas possible, on peut tracer un bilan. On représente en rouge la dispersion, en jaune l’aléatoire et en vert l’agglomération. En cas d’un changement de comportement selon la valeur de r , on indique la variation par deux couleurs dans la case correspondante.

STRUCTURATION DES GROUPES DE DÉCILES EN FONCTION DU TYPE D'ECHANTILLONNAGE									
Observé Référence	Groupe 1			Groupe 2			Groupe 3		
	DF	CA	1 CA	DF	CA	1 CA	DF	CA	1 CA
Groupe 1	Dark Green	Dark Green	Yellow	Red	Red	Yellow	Red	Red	Yellow
Groupe 2	Light Green	Red	Light Green	Orange	Dark Green	Yellow	Orange	Orange	Yellow
Groupe 3	Dark Green	Red	Light Green	Dark Green	Dark Green	Yellow	Dark Green	Dark Green	Yellow

Figure 14: Structuration des groupes de déciles en fonction du type d'échantillonnage

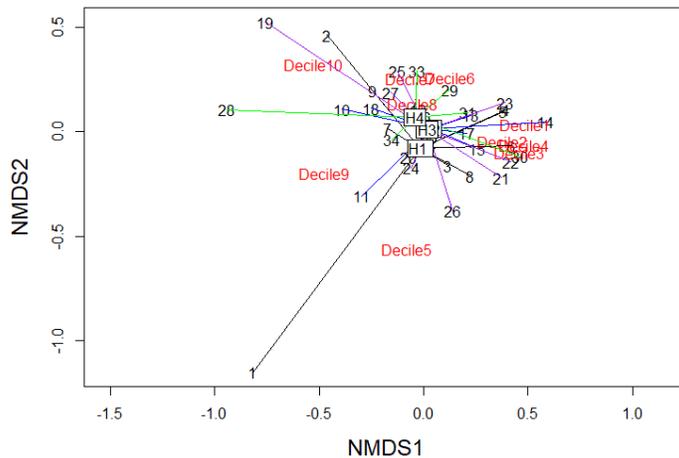
D'après cette analyse, le protocole ECOTECH semble perdre la structuration des dépôts, tout particulièrement pour les dépôts de fortes valeurs. Entre l'échantillonnage par disques foliaires et collecteurs artificiels, peu de changement apparaissent. Seul le groupe 2 se différencie de DF à CA, ceci s'explique par sa répartition aléatoire. D'après ces résultats, on pourrait penser que l'on perd totalement l'information concernant la structure des dépôts. Cependant, en observant à des niveaux d'agrégation différents de la distribution des dépôts, il est possible de s'attendre à retrouver la structure réelle.

7.2.5 Mise à l'échelle multidimensionnelle non métrique

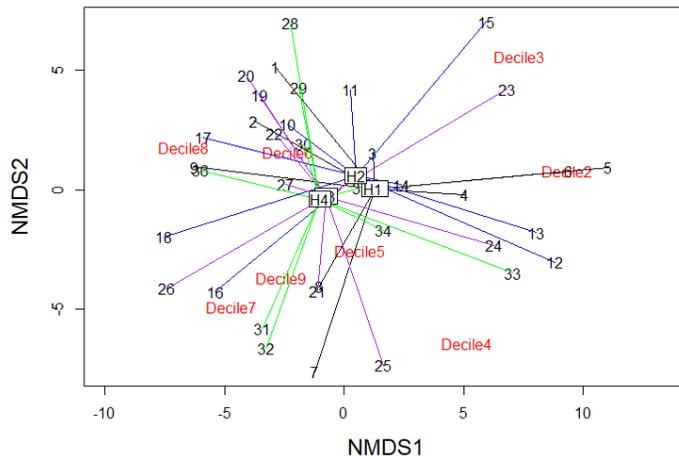
Dans cette dernière partie, nous allons à nouveau étudier la structuration des déciles de dépôts en répartissant les mailles en divers sites spatiaux. Au sein d'un même site la position d'un échantillon n'est pas prise en compte.

On commencera dans un premier temps l'analyse, en construisant nos sites en fonction de leur hauteur, soit quatre sites, un pour chaque hauteur. On poursuivra ensuite l'étude en divisant nos sites par leurs profondeurs, pour créer trois sites, le premier avec les trois premières profondeurs, le second avec les trois suivantes et enfin le dernier avec les trois dernières profondeurs. Dans chacun des cas, on s'intéressera aux différences significatives entre nos sites, en appliquant un test d'Anosim et en effectuant une analyse des espèces indicatrices.

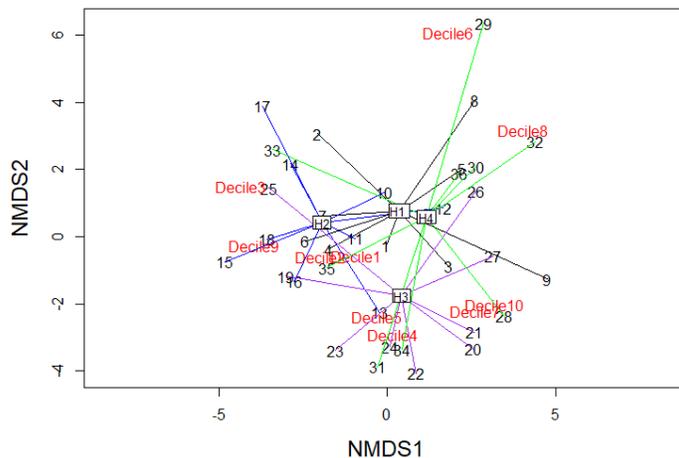
Par lecture graphique sur nos sites divisés par leur hauteur, on ne semble pas distinguer de différence formelle entre nos différents sites pour le protocole des disques foliaires. Pour confirmer cette observation, appliquons le test d'Anosim, avec pour hypothèse nulle; il n'y a pas de différence de déciles entre les sites géographiques, on obtient ainsi une p-value de 0,7016 pour les disques foliaires. Ainsi, pour une étude au niveau d'agrégation des déciles, nos sites constitués à partir des quatre hauteurs ne présentent pas de différences significatives en terme de dépôts interceptés. Concernant les deux cas suivant, on obtient une p-value de 0.7632 pour les collecteurs artificiels et de 0.213 pour la simulation ECOTECH, nous ne rejetons pas l'hypothèse nulle, ce qui permet de conclure à nouveau de l'absence de différence significative entre nos sites. Cependant, par lecture graphique, nous remarquons une perte de précision avec le protocole ECOTECH, les sites ont tendance à s'éloigner les uns des autres dans le plan, contrairement aux sites obtenus par le protocole des disques foliaires.



(a) Disques foliaires



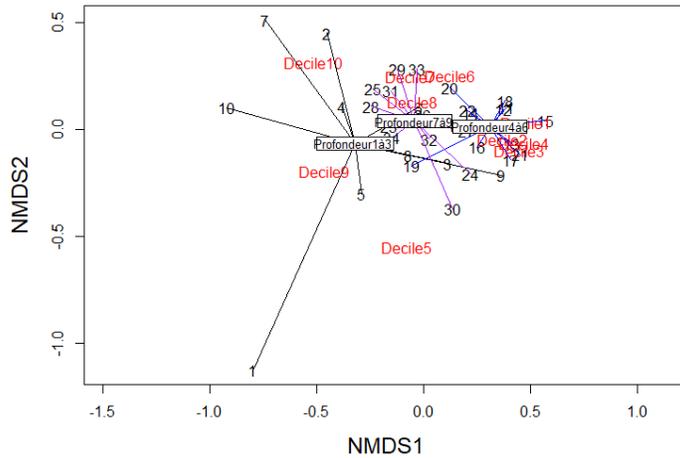
(b) Collecteurs artificiels



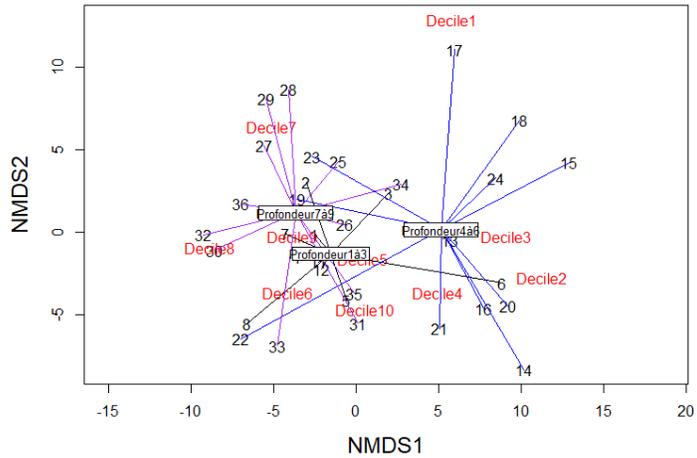
(c) Simulation protocole ECOTECH

Figure 15: Structuration des déciles pour un découpage en hauteur

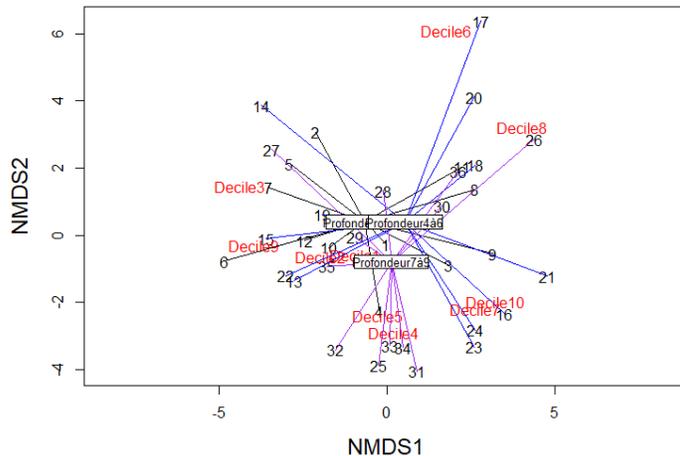
Passons maintenant au découpage des sites selon leur profondeur. Nous nous attendons à retrouver le phénomène de dilution du produit de protection de la vigne, en effet, par lecture graphique, on observe que les faibles déciles s'agglutinent autour des profondeurs centrales dans le cas des disques foliaires et des collecteurs artificiels. En appliquant le test d'ANOSIM, on obtient une p-value de $1e-04$ pour les deux premiers protocoles, ce qui permet de rejeter H_0 , nos sites sont donc différents significativement. Effectuons dans ce cas, une analyse des espèces indicatrices. Le résultat est que le site 46 (profondeur 4 à 6) est constitué de manière significative des déciles 1,2,3,4,6 et 8 dans le cas des disques foliaires. Lorsque l'on effectue la même analyse pour les collecteurs artificiels, seuls les déciles 2 et 3 sont en contribution significative à ce site. Enfin, dans le cas du protocole ECOTECH, les résultats obtenus ne permettent pas de conclure de la même façon, la différence significative entre les trois sites n'apparaît plus (p-value > 0.05).



(a) Disques foliaires



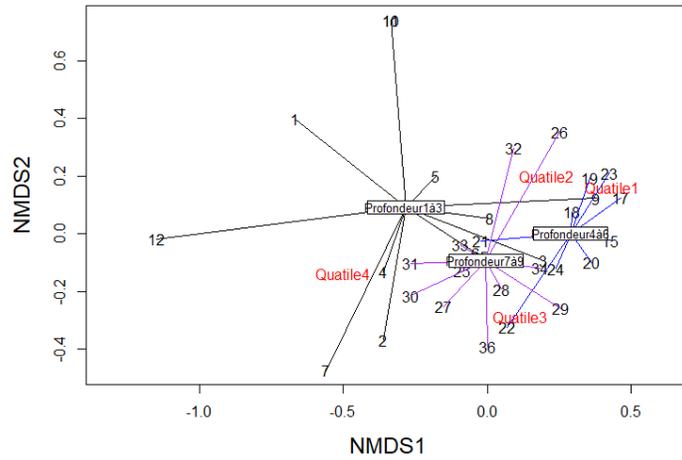
(b) Collecteurs artificiels



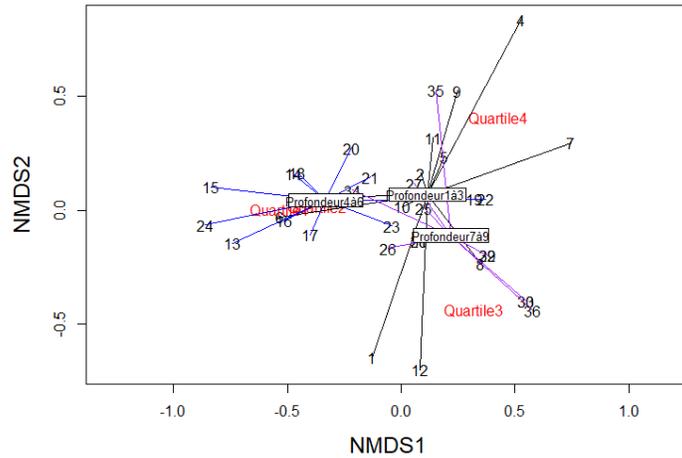
(c) Simulation protocole ECOTECH

Figure 16: Structuration des déciles pour un découpage en profondeur

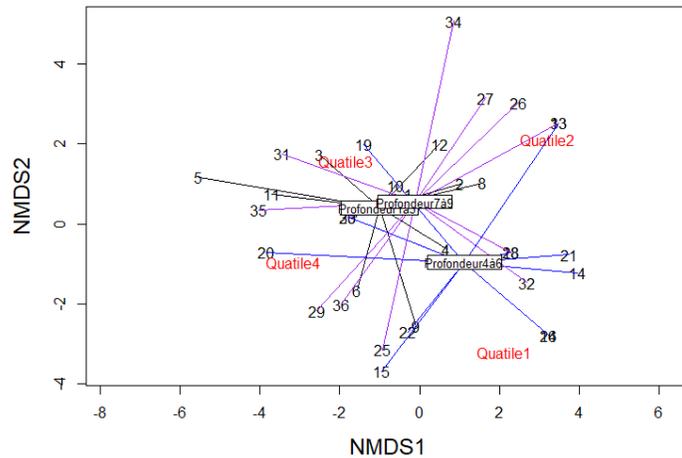
Réitérons la même analyse, mais avec un autre niveau d'agrégation, celui des quartiles, on retrouve naturellement les mêmes résultats pour les disques foliaires et les collecteurs artificiels, ce sont les plus faibles quartiles qui s'agglutinent autour du site 46 (profondeur 4 à 6), et donc une différence significative entre nos trois sites. Concernant le cas avec le protocole ECOTECH, on obtient avec le test d'ANOSIM, une p-value de 0,0051 qui nous permet de rejeter H_0 , ainsi pour une étude des profondeurs au niveau d'agrégation des quartiles, il y a conservation de la structuration observée dans le cas des disques foliaires. Cependant, nous sommes toujours face au même problème de perte d'information sur les quartiles caractéristiques du site 46. Seul le premier quartile le caractérise dans le cas du protocole ECOTECH, tandis que le site 46 est caractérisé par les deux premiers quartiles dans l'échantillonnage par trois collecteurs artificiels et les trois premiers quartiles pour l'échantillonnage par disques foliaires.



(a) Disques foliaires



(b) Collecteurs artificiels



(c) Protocole ECOTECH

Figure 17: Structuration des quartiles pour un découpage en pousse de raisin

Après avoir fait l'étude des hauteurs et des profondeurs, un dernier point d'intérêt est la création de sites géométriquement différents. Par exemple, une structuration intéressante à étudier est de distinguer deux sites, l'un avec des grappes et l'autre sans grappes. L'intérêt est de déterminer si les zones de croissances des grappes sont les mieux ou les moins bien protégées.

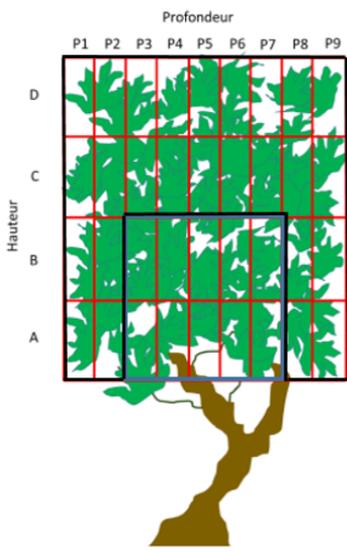
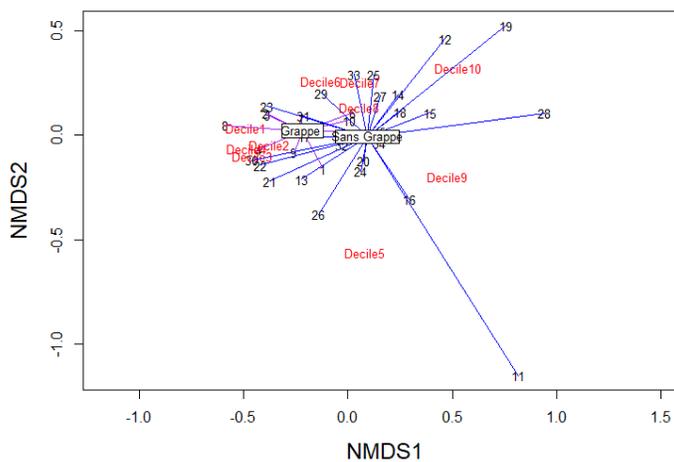


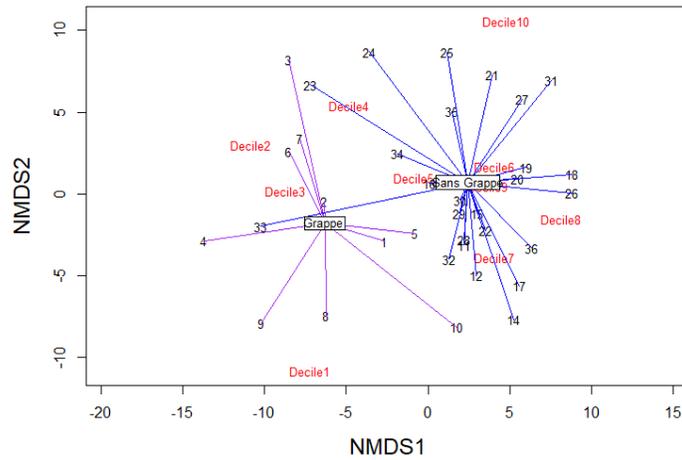
Figure 18: Découpage en deux zones : Zones des grappes (bleu) Zones sans grappes (Noir)

Dans cette configuration, on observe que pour l'ensemble de nos trois protocoles d'échantillonnage, qu'il existe une différence significative entre nos deux sites. Cependant, en effectuant une analyse des espèces indicatrices, une perte de précision apparaît. En effet, l'analyse fait ressortir moins de groupe de déciles appartenant significativement au site des grappes avec une simulation du protocole ECOTECH qu'avec les deux autres protocoles.

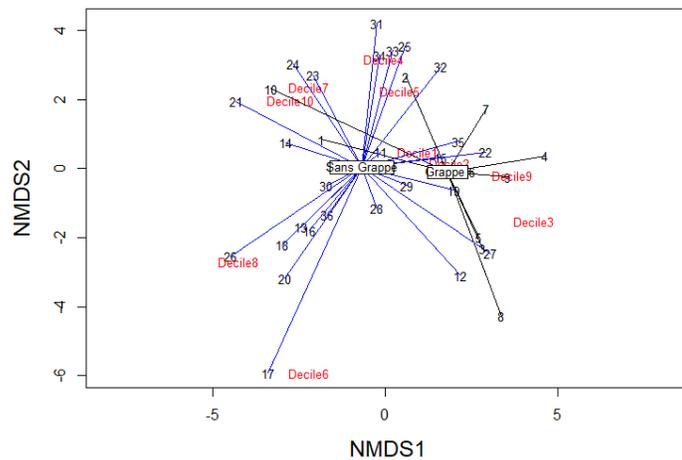


(a) Disques foliaires

Malgré la conservation de la différence significative de nos sites, il n'est pas possible de les caractériser aussi bien qu'avec des disques foliaires. On peut tout de même conclure que les zones de pousse de grappes sont les moins bien traités, en effet, les dépôts pulvérisés appartiennent de manière significative aux groupes des plus faibles déciles.



(a) Collecteurs artificiels



(a) Collecteurs artificiels

Figure 21: Structuration des déciles pour un découpage en pousse de raisin

Ces résultats ont mis en évidence qu'en étudiant les dépôts interceptés selon un gradient de profondeur, en considérant le niveau d'agrégation du décile pour distinguer les populations, qu'on ne conserve pas, avec le protocole d'échantillonnage usuel de l'UMT ECOTECH, la structuration étudiée sur disques foliaires. Il a donc été nécessaire de réaliser la même analyse à un niveau d'agrégation plus élevé, en procédant par quartiles. A ce niveau d'agrégation, on parvient à observer une différence entre les niveaux de profondeur avec le protocole usuel, mais cette différence n'est pas très bien caractérisée.

L'étude de la structuration des dépôts nous aura donc apporté une très grande quantité d'information. Nous obtenons une confirmation du phénomène de dilution et de moindre pénétration du PPP dans le centre du

couvert végétal (des surfaces externes vers le centre du maillage). Nous obtenons en effet une présence significative de faibles déciles au centre du couvert végétal. De plus cette analyse nous a permis de déterminer les limites du protocole usuel de l'UMT ECOTECH. En effet, ce dernier ne permet pas de représenter la distribution des dépôts avec précision. Selon les sites étudiés dans le couvert végétal, il est parfois nécessaire d'étudier les dépôts au niveau d'agrégation du quartile et non du décile pour conserver sa structure (sites caractérisés par les profondeurs). Le principal défaut de ce protocole est que pour la caractérisation des différents sites, il ne conserve pas la totalité des quartiles ou déciles qui le représente significativement, on perd donc en précision. Les outils que nous avons utilisé se sont révélés adaptés à mettre en évidence les limites du protocole usuel de l'UMT et nous ont permis d'affirmer l'existence d'une structure spatiale, que nous avons pu décrire en précision avec les outils d'économétrie spatiale

8 Perspectives sur le plan scientifique

Afin d'améliorer la caractérisation des distributions de dépôt, plusieurs perspectives sont envisageables :

- L'une d'elles serait de régler l'absence de positionnement réel des données (dans un espace euclidien). Actuellement, nous avons accès uniquement à la maille d'appartenance du dépôt. Utiliser des collecteurs géolocalisés serait un avantage pour améliorer la caractérisation spatiale et structurelle des dépôts.
- Pour améliorer le protocole d'échantillonnage, il serait nécessaire de placer plus de collecteurs dans le centre de la végétation (où la variabilité est la plus importante). Pour conserver un coût expérimental acceptable, il faudrait compenser en réduisant le nombre de collecteurs sur la périphérie. Une autre possibilité est de réaliser un placement hétérogène des collecteurs entre sections successives. En effet, à nombre égal de collecteurs, il est possible d'améliorer la précision de représentativité avec un meilleur placement.
- Il pourrait être utile de prendre en compte d'autres technologies de pulvérisateur et conduites de vigne afin d'appliquer ces indicateurs et attester de leur efficacité pour caractériser la distribution et répartition de dépôts.
- Lors de l'analyse des dépôts, nous n'avons pas distingué le côté supérieur et inférieur de la feuille. Cependant, certaines maladies ont pour conséquences de faire apparaître les premières tâches de contamination sur la face inférieure de la feuille. De plus, selon l'orientation des organes de pulvérisation, certains cotés des feuilles sont plus accessibles que d'autres. Il serait donc important de savoir comment ajuster les doses en PPP à appliquer afin de protéger convenablement la plante.

Cet ensemble de perspectives est sans doute nécessaire pour concevoir les règles d'adaptation en pulvérisation.

9 Conclusion

L'objectif de ce rapport était d'éclairer la décision en pulvérisation des produits phytosanitaires dans le but d'accroître la qualité et la précision de pulvérisation des produits de protection des plantes et de réduire les effets négatifs sur l'environnement qui leur sont intrinsèques. Un moyen d'y parvenir est d'avoir une meilleure connaissance sur la distribution et la répartition spatiale des produits. Dans les travaux habituels en pulvérisation de précision, la modélisation des dépôts est liée au dépôt moyen pulvérisé au sein du couvert végétal. Cependant, grâce à des données comparatives avec des protocoles de mesure des dépôts réalisés avec des disques foliaires et avec des collecteurs artificiels, nous avons pu conclure que la répartition spatiale des dépôts est très variable, tout particulièrement dans le centre de la végétation. Cela nous montre donc qu'il n'est pas suffisant d'utiliser la moyenne des dépôts pour caractériser les espaces de végétation en sur-traitement ou sous-traitement. La description des dépôts par une distribution statistique et des indicateurs spatiaux et structurels est donc à privilégier pour améliorer la protection des vignes.

De plus, nous avons pu montrer la limitation d'une homogénéisation du nombre de collecteurs dans le maillage. Pour obtenir une bonne représentation de la distribution réelle des dépôts sur feuilles, il sera nécessaire de mieux placer les collecteurs, notamment, en ajoutant une plus grande quantité de ces derniers dans le centre de la végétation. Il est important de noter que le protocole ECOTECH utilisé dans l'ensemble des manipulations est limité dans sa capacité de représentation de la réalité des dépôts. Lorsqu'on souhaite étudier précisément les dépôts au niveau d'agrégation du décile, le protocole ECOTECH pose des difficultés de répétabilité, avec le risque de se retrouver dans une configuration aléatoire.

En utilisant les méthodes et les indicateurs développés dans ce rapport, il est envisageable de développer des modèles statistiques capables de prédire la distribution et la répartition des dépôts au sein du couvert. Cela permettra donc d'être plus à même de gérer les doses à pulvériser sur les vignes en prenant en compte la maladie ainsi que la phase phénologique de la végétation.

10 Conclusion personnelle

Ce stage m'a avant tout permis de découvrir de nouveaux domaines du monde du travail, ceux de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement. N'ayant jamais effectué de stage en dehors de l'université de Poitiers, j'ai pu m'enrichir de nombreuses nouvelles compétences tout le long de ces six mois.

En effet, au cours de ce stage, j'ai eu à réaliser de nombreuses analyses de données en appliquant dans certains cas des méthodes statistiques que je ne connaissais pas. De fait, j'ai utilisé un grand nombre d'outils statistiques, que ce soit du plus classique (moyenne, médiane, densité) aux plus complexes (fonction cumulative de structuration, NMDS...). Étant très libre sur mes analyses, cela m'a appris à devoir m'adapter et à m'organiser pour faire face aux problèmes que je pouvais rencontrer.

Les compétences acquises lors de mes cinq années de formation (et tout particulièrement lors de mes deux années de master) à l'Université de Poitiers m'ont été très utiles, j'ai en effet pu appliquer mes connaissances dans les différents travaux que j'ai eu à réaliser, même dans le cas de méthodes statistiques que je ne connaissais pas, puisqu'on y retrouvait tout de même une base commune avec d'autres domaines étudiés (notamment en série temporelles).

Le stage fut très enrichissant grâce à l'expérience de mes encadrants, ce fut un véritable plaisir de travailler avec eux, ils m'ont beaucoup appris et très bien conseillé tout le long du stage.

J'ai également eu de nombreuses reprises l'occasion de discuter avec d'autres chercheurs, ingénieurs ou doctorants qui m'ont fait découvrir leurs sujets de recherches et méthodes de travail, ce qui fut très instructif.

Ce stage fut donc très enrichissant autant sur le point technique que sur le point humain, j'estime avoir gagné en compétences dans de nombreux domaines : autonomie, travail en équipe, recherche bibliographique, capacité d'analyse, maîtrise d'outils statistiques, et tout cela dans une ambiance très agréable que ce soit dans le travail ou lors des moments de détente.

Une très belle expérience, enrichissante et bénéfique pour mon avenir professionnel résumerait parfaitement ces 6 mois de stage.

11 Bibliographie

Références

- [1] Codis. S. et al., 2016. Mieux et moins traiter la vigne : moduler les doses dans la saison. UMT EcoTechViti (IFV, IRSTEA, Montpellier SupAgro) Montpellier.
- [2] Cheraiet, A., 2020. Thèse : Modélisation expérimentale et statistique des relations entre caractéristiques morphologiques de la vigne et dépôts de pulvérisation : application à l'agriculture de précision. Université de Montpellier.
- [3] Chah. A. Y., 2021. Simulation par approche géostatistique de la répartition spatiale des pesticides au sein du couvert végétal pour le diagnostic et l'optimisation de la performance agro-environnementale de la pulvérisation viticole. Université de Lille.
- [4] Cheraiet, A. et al., 2020. An algorithm to automate the filtering and classifying of 2D LiDAR data for site-specific estimations of canopy height and width in vineyards Biosystems Engineering, Elsevier, 200, pp.450-465.
- [5] Loonis, V. De Bellefon, M-P., 2018. Manuel d'analyse spatiale - Théorie et mise en oeuvre pratique avec R, Insee - Eurostat.
- [6] Ripley, B. D., 1976. The second-order analysis of stationary point processes. Journal of Applied Probability, pp. 255-266.
- [7] Desbois. D., 2005. Mise à l'échelle multidimensionnelle . MODULAD.
- [8] Somerfield, Paul. et al., 2021. A generalised analysis of similarities (ANOSIM) statistic for designs with ordered factors. Austral Ecology
- [9] Ricco. Rakotomalala., 2012. Analyse de corrélation Étude des dépendances - Variables quantitatives. Université Lumière Lyon 2.

Listes des figures

1	Représentation en vue de profil d'une section de végétation et du maillage utilisé. Quatre classes de hauteur (A - D) et neuf classes en profondeur (P1 - P9)	8
2	La fonction K de Ripley dans les trois configurations	10
3	Exemple de l'évolution du stress en fonction du nombre de dimensions	12
4	Box plots des dépôts de PPP selon le type d'échantillonnage	16
5	Courbes de densités empiriques des valeurs de dépôt en fonction de la section de végétation considérée.	16
6	Simulations de courbes de densité empiriques des dépôts en fonction de la section de végétation considérée sur les collecteurs artificiels en suivant le protocole ECOTECH	17
7	Courbes de densité empiriques des valeurs de dépôt en fonction de la section de végétation considérée.	17
8	Simulation de courbes de densité empiriques des valeurs de dépôt en fonction de la section de végétation considérée avec le protocole ECOTECH	18
9	Répartitions spatiales des faibles dépôts par estimation du noyau à bande passante fixe selon le type d'échantillonnage	19
10	Répartition spatiale des forts dépôts par estimation du noyau à bande passante fixe selon le type d'échantillonnage	20
11	Structuration du groupe des 4 premiers déciles avec des disques foliaires vis à vis des trois groupes en observation	21
12	Structuration du groupe des 4 premiers déciles avec des collecteurs artificiels vis à vis des trois groupes en observation	22
13	Structuration du groupe des 4 premiers déciles avec le protocole ECOTECH vis à vis des trois groupes en observation	22
14	Structuration des groupes de déciles en fonction du type d'échantillonnage	23
15	Structuration des déciles pour un découpage en hauteur	24
16	Structuration des déciles pour un découpage en profondeur	25
17	Structuration des quartiles pour un découpage en pousse de raisin	26
18	Découpage en deux zones : Zones des grappes (bleu) Zones sans grappes (Noir)	27
21	Structuration des déciles pour un découpage en pousse de raisin	28

Listes des tables

1	Premières lignes du jeu de données	15
2	Statistiques descriptives des dépôts selon le type d'échantillonnage	15

12 Résumé

Suite aux nouvelles normes sociétales de ces dernières années, il est devenu impératif de réduire l'usage des produits de protection des plantes, et donc repenser les techniques de protection de la vigne. À l'heure actuelle, les quantités de pulvérisation sont appliquées selon les doses homologuées (dose d'AMM, autorisation de mise sur le marché) qui sont définies par hectare cadastral de parcelle. En effet, le mode de conduite, l'espacement inter-rangs, la phase phénologique de la vigne ne sont pas considérés.

L'objectif de ce rapport était d'éclairer la décision en pulvérisation des produits phytosanitaires au sein du couvert végétal de sorte à protéger efficacement la vigne, en tenant compte de sa structure et du pulvérisateur utilisé. Pour cela, il est nécessaire de déterminer des indicateurs statistiques, spatiaux et structurels qui permettent la caractérisation des dépôts en termes de distribution et de répartition. Il était également nécessaire de juger l'efficacité des protocoles utilisés lors des mesures de dépôts afin de connaître leur précision.

Il a été acquis sur plusieurs placettes de vignes des données de distribution des quantités de PPP déposé par unité de surface dans les différentes strates du couvert végétal. Une partie de ce rapport concerne l'étude de ses dépôts à l'échelle d'un cep de vigne interceptés soit par des disques foliaires ou des collecteurs artificiels. Il apparaît de manière significative que la répartition des dépôts au sein de la végétation est très variable, tout particulièrement au centre de la végétation, nous permettant donc de conclure sur l'insuffisance d'utiliser la moyenne des dépôts comme indicateur pour la pulvérisation de précision. Une partie du rapport a aussi consisté à étudier la différence de collecte des dépôts avec un échantillonnage par disques foliaires et un autre par collecteurs artificiels. Nous avons pu en conclure qu'un échantillonnage par disque foliaire permet une collecte de plus faibles et forts dépôts. Nous avons également observé que les collecteurs artificiels offrent une représentation de la répartition spatiale des dépôts plus homogène que la répartition réelle. Une dernière partie de ce rapport concerne l'étude d'efficacité du protocole ECOTECH, un protocole utilisant un faible nombre de collecteurs artificiels. Il en ressort que dans certains cas, il n'est pas représentatif de la distribution réelle des dépôts, sa précision est critiquable, il en est ressorti qu'il ne conserve pas toujours la structuration des dépôts au niveau d'agrégation des déciles.

13 Abstract

Following the new societal norms of recent years, it has become imperative to reduce the use of plant protection products, and therefore rethink the techniques for protecting the vine. At present, the quantities of spraying are applied according to the approved doses (MA dose, marketing authorisation) which are defined per cadastral hectare of plot, in fact, the mode of driving, the spacing between rows, the phenological phase of the vine are not considered.

The objective of this report was to clarify the decision in spraying phytosanitary products within the plant cover. so as to effectively protect the vine, taking into account its structure and the sprayer used. For this, it is necessary to determine statistical, spatial and structural indicators that will allow the characterization of deposits in terms of distribution and distribution. It was also necessary to judge the effectiveness of the protocols used during the deposit measurements in order to know their precision and their ability to correctly sample deposits,

On several plots of vines, data on the distribution of the quantities of PPP deposited per unit area in the different strata of the plant cover were acquired. Part of this report concerns the study of its deposits at the scale of a vine stock intercepted either by leaf discs or artificial collectors. It appears significantly that the distribution of deposits within the vegetation is very variable, especially in the center of the vegetation, thus allowing us to conclude on the insufficiency of using the average of the deposits as an indicator for precision spraying. . Part of the report also consisted in studying the difference in collection of deposits with sampling by follary discs and another by artificial collectors, we were able to conclude that sampling by follar disc allows collection of weaker and stronger deposits, we also observed that the artificial collectors offer a more homogeneous representation of the spatial distribution of the deposits than the real distribution. A last part of this report concerns the study of the effectiveness of the ECOTECH protocol, a protocol using a small number of artificial collectors, it emerges that in certain cases, it is not representative of the real distribution of the deposits, its precision is questionable, it emerged that it does not preserve the structuring of the deposits (during a study of the depths of the plant cover) at the precision scale of the deciles.