



Université de Rouen Normandie - UFR Sciences et Techniques
Master 2 mention Bioinformatique – Parcours BIMS
2023 - 2024

Rapport de stage

Analyse textuelle d'article scientifiques évaluant l'impact des vers de terre sur l'environnement

Présenté et soutenu par

Antoine Malet

Campus Agro Paris Saclay, Unité MIA Paris-Saclay
Equipe SOLsTIS

Encadrants :

David Makowski
Sophie Donnet





Université de Rouen Normandie - UFR Sciences et Techniques
Master 2 mention Bioinformatique – Parcours BIMS
2023 - 2024

Rapport de stage

Analyse textuelle d'articles scientifiques évaluant l'impact des vers de terre sur l'environnement

Présenté et soutenu par

Antoine Malet

Campus Agro Paris Saclay, Unité MIA Paris-Saclay
Equipe SOLsTIS

Encadrant :

David Makowski
Sophie Donnet



Remerciements

En premier lieu, j'aimerais remercier mes encadrants pour ce stage, Mme Sophie DONNET et M. David MAKOWSKI, pour avoir accepté ma candidature et accueilli au sein de leur équipe. Merci aussi pour leurs conseils et leurs efforts d'accompagnement et de relecture de mes travaux ! Je tiens aussi à adresser un mot particulier à mes vaillants collègues de bureau Emré ANAKOK et Caroline COGNOT, pour leur compagnie perpétuelle et leurs très bons conseils.

Je remercie aussi Louis LACOSTE, pour ses excellents conseils en R et en cinématographie, ainsi que François VICTOR, pour ses généreuses explications en statistiques théoriques auxquelles je n'ai pas compris grand-chose. Merci aussi à Armand FAVROT, pour son accueil et ses invitations aux Eventos des repas organisés par la cafet (les fraises maison étaient légendaires !). Enfin, chaleureuses salutations à tous mes collègues de pause café, qui sont toujours restés sympathiques et accueillants même si je n'ai jamais bu la moindre goutte de café. Courage, peut-être qu'un jour vous me convertirez à votre religion !

Merci enfin à tous ceux que je n'ai pas nommés, particulièrement aux personnels qui prennent soin des locaux en silence, sans qui l'infrastructure de travail ne pourrait pas fonctionner correctement.

Table des matières

Remerciements	I
Table des matières	III
Liste des Abréviations	VII
1 Introduction	1
1.1 Unité MIA, Campus Agro Paris Saclay	1
1.2 Le vers de terre dans la littérature scientifique	2
1.3 Objectifs de mon travail	3
2 Ressources	5
2.1 Environnement informatique	5
2.2 Pratique Professionnelle	5
2.2.1 Veille bibliographique et technologique	5
2.2.2 Bonnes pratiques	5
2.2.3 Communication des travaux	6
2.3 Outils informatiques et statistiques	6
2.3.1 Récupération des abstracts et des métadonnées avec Python	6
2.3.2 Text Mining avec R	8
2.4 Données	9
3 Résultats	11
3.1 Web-scraping et obtention d'une base de métadonnées en format CSV	11
3.2 Présentation de la démarche et analyse des textes bruts	12
3.3 Analyse de sentiment	12
3.4 Approche tf-idf et loi de Zipf	12
3.5 Analyses de bigrammes seuls	12
3.6 Réseaux de bigrammes	12
4 Discussion	13
5 Conclusion	15

Table des figures

1.1	Organigramme de l'UMR MIA Paris-Saclay	1
1.2	Les services écosystémiques rendus par les vers de terre.	2
1.3	Distribution régionale de <i>Lumbricus rubellus</i> (espèce exotique) aux USA. . . .	3
3.1	Impression écran montrant les 46 premières lignes du fichier CSV issu du Web-scraping et employé comme base de données pour la suite des analyses.	11

Liste des Abréviations

ASCII American Standard Code for Information Interchange

API Application Programming Interface

CSS Cascade Style Sheet

DOI Digital Object Identifier

HTML Hypertext Markup Language

IDE De l'anglais, Environnement de Développement Intégré

MA Métaanalyse

MIA Mathématiques et Informatique Appliquée

Rmd R Markdown

RG ResearchGate

RGS2 ResearchGateScraper2.py

UMR Unité Mixte de Recherche

Glossaire

JSON : JSON (JavaScript Object Notation) est un format de fichier textuel conçu pour la structuration et l'échange de données (<https://www.hostinger.fr/tutoriels/quest-ce-que-json>).

Markdown : Markdown est un langage de balisage léger qui permet de formater du texte de manière simple et rapide. Il utilise des caractères spéciaux pour indiquer les éléments de mise en forme, tels que les titres, les listes, les liens, etc. Les fichiers Markdown peuvent être convertis en HTML pour être affichés sur un site web ou dans un logiciel de traitement de texte (source : <https://bilty.fr/definition-markdown/>).

Métaanalyse : Article scientifique présentant la combinaison des résultats statistiques d'une série d'études indépendantes sur un problème donné.

N-gram : Suite de mots consécutifs de taille n (une des possibilités de tokenisation). Utile pour comprendre les relations logiques entre les mots. Les bigrammes sont un cas particulier de n -gram (n -gram de longueur 2).

Racinisation (linguistique) : Obtention du radical, par exemple par dépréfixation ou désuffixation (*Exemple* : "enhance", "enhances" et "enhancement" deviennent tous "enhanc").

Réseau de n -grams : Figure permettant de visualiser toutes les relations entre les différents tokens simultanément, plutôt que deux par deux. Cela permet d'aller plus loin que l'analyse de bigrammes séparés les uns des autres.

Sélecteurs CSS : Les sélecteurs définissent les éléments sur lesquelles s'applique un ensemble de règles CSS (langage de programmation employé pour mettre en forme une page Web). Ils peuvent être employés en Web scraping pour cibler et isoler certains éléments d'intérêt.

Token : Unité textuelle souvent réduite, voire ne comprenant qu'un seul mot, issue du processus de tokenisation.

Tokenisation : Processus consistant à découper un texte ou un corpus de textes en unités textuelles plus réduites, comme des mots, des n -grams ou des phrases.

Text-mining : Processus d'analyse textuelle consistant à transformer un texte non structuré en données structurées pour ensuite procéder à l'analyse. Cette pratique repose sur la technologie de « Natural Language Processing » (traitement du langage naturel), permettant aux machines de comprendre et de traiter le langage humain automatiquement (source : <https://datascientest.com/text-mining-definition>).

Web scraping : Technique permettant d'extraire automatiquement de grandes quantités d'informations d'un site Web, sans intervention humaine directe, via un script informatique (source : <https://moncoachdata.com/blog/web-scraping-pratique/>).

Chapitre 1

Introduction

1.1 Unité MIA, Campus Agro Paris Saclay

Mon stage s'est déroulé au sein de l'Unité MIA (Mathématique et Informatique Appliqués), à l'INRAE du Campus Agro Paris Saclay, sur le plateau de Saclay. L'UMR MIA Paris-Saclay, associée aux tutelles AgroParisTech, INRAE et Université Paris Saclay, regroupe des statisticiens et des informaticiens spécialisés dans la modélisation et l'apprentissage statistique et informatique pour la biologie, l'écologie, l'environnement, l'agronomie et l'agro-alimentaire.

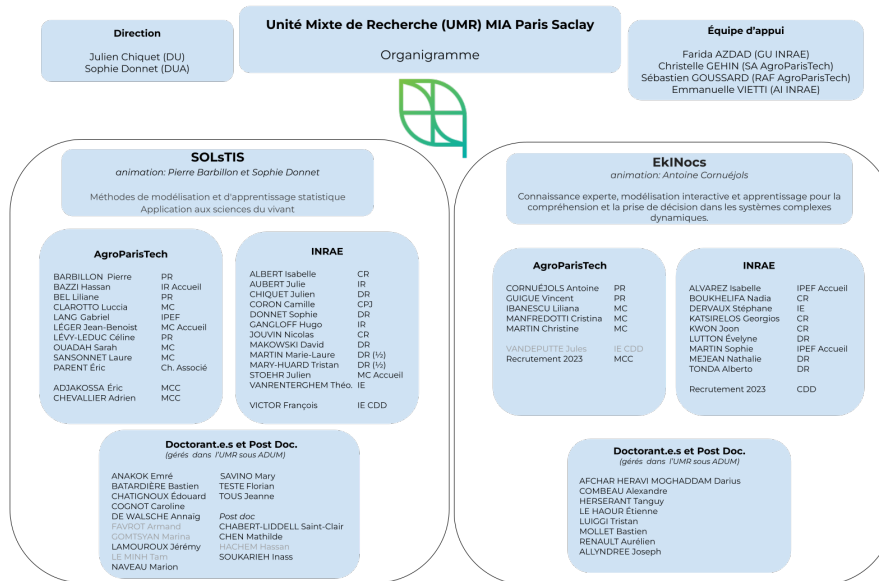


FIGURE 1.1 – Organigramme de l'UMR MIA Paris-Saclay

Les compétences mises en oeuvre portent sur les méthodes d'inférences statistiques et algorithmiques. L'unité développe des méthodes statistiques et informatiques originales, génériques ou motivées par des problèmes précis en science du vivant. Ses activités s'appuient sur une bonne culture dans les disciplines destinataires : écologie, environnement, agro-alimentaire, biologie moléculaire et biologie des systèmes. L'unité MIA est dirigée par Julien CHIQUET et Sophie DONNET, et comprends deux équipes distinctes : l'équipe SOLsTIS (Statistical mOdeling and Learning for environnemenT and Life Science) dirigée par Sophie

DONNET et Pierre BARBILLON, et l'équipe EkiNocs (Expert Knowledge, INteractive modelING for understandING and decisiOn makING in dINamic Complex Systems), dirigée par Antoine CORNUÉJOLS.

En tant que stagiaire, j'ai ainsi pu intégrer SOLsTIS (fig. 1.1) pour mettre au point des méthodes informatiques et statistiques pour l'analyse textuelle d'abstracts d'articles scientifiques. L'unité comprends 63 membres tous statuts et équipes confondus, dont 40 appartiennent à l'équipe SOLsTIS, 19 à l'équipe EkiNocs et 4 membres d'appui.

1.2 Le vers de terre dans la littérature scientifique

Pour caractériser le rôle écologique des vers de terre d'après la littérature scientifique disponible, les abstracts (courts résumés **standardisés**) de 116 articles scientifiques issus de 4 métaanalyses distinctes ont été fournis sous forme de fichier CSV pour être analysés informatiquement. Selon la perception actuelle des spécialistes du sujet en Europe, les services écosystémiques rendus par les vers de terre sont multiples (fig. 1.2)[7] :

- Ils permettent une meilleure aération des sols ([6]).
- Ils favorisent le recyclage des éléments nutritifs, du carbone, et du phosphore ([8]).
- Ils jouent un rôle important dans le recyclage de la matière organique des sols ([3]).
- Leur activité de décomposeurs (minéralisation de la matière organique) favorise la croissance d'autres organismes de l'environnement, augmentant de ce fait la productivité des plantes ([1]).
- Ils sont essentiels pour la structuration, l'entretien et la productivité des sols, forestiers, prairiaux et agricoles ([11]).

Cependant, la position argumentative défendue par les spécialistes d'Amérique du Nord est très différente, pour ne pas dire radicalement opposée. On peut résumer la perception nord-américaine comme suis :

- Les vers de terre exotiques (venus d'Europe et d'Asie) sont des espèces invasives susceptibles de perturber les écosystèmes natifs ([9]). Voir fig. 1.3.
- Leur présence dans les sols modifie durablement les propriétés physico-chimiques des écosystèmes souterrains ([2]).
- Les modifications physico-chimiques induites par les espèces exotiques causent une baisse globale de la biodiversité chez les espèces natives du milieu ([4]).
- L'impact de ces espèces exotiques sur les émissions de gaz à effet de serre est également sujet à controverse ([10, 5]).

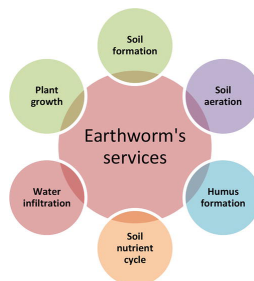


FIGURE 1.2 – Les services écosystémiques rendus par les vers de terre.

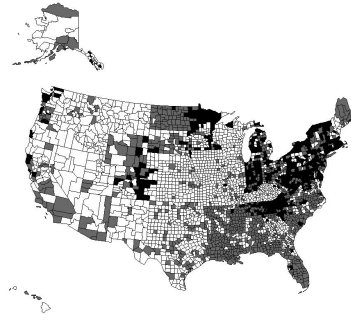


FIGURE 1.3 – Distribution régionale de *Lumbricus rubellus* (espèce exotique) aux USA. Les régions représentent les stations où : *L. rubellus* a été retrouvé (**noir**), une autre espèce que *L. rubellus* a été retrouvée (**gris**), aucune donnée n'est disponible (**blanc**). *Source* : <https://daphnia.ecology.uga.edu/drakelab/?p=318>.

1.3 Objectifs de mon travail

L'analyse informatique des abstracts des articles issus des 4 métaanalyses a été conduite pour répondre à la question de recherche suivante :

Les méthodes statistiques de Text-mining permettent-elles d'identifier des groupes distincts d'articles scientifiques défendant une conception opposée du rôle écologique du vers de terre au sein du corpus de texte fourni pour l'analyse ?

Pour répondre à cette question, nous procéderons en deux étapes :

1. Création d'une base de métadonnées (comprenant notamment les **abstracts** de chaque étude indépendante formant les 4 métaanalyses) via un script Python de Web-scraping, sous forme d'un fichier CSV brut destiné à être analysé.
2. Analyse textuelle des abstracts d'articles scientifiques présents dans le fichier CSV issu de l'étape précédente via un script R.

Une fois ces étapes achevées, nous discuterons les résultats obtenus et les méthodes employées en les comparant avec ceux d'autres articles de la littérature scientifique spécialisés dans ce domaine.

Chapitre 2

Ressources : pratiques professionnelles, environnement informatique, outils informatiques et statistiques, données

2.1 Environnement informatique

Le matériel qui m'a été fourni par le laboratoire est un ordinateur fixe HP Elite SFF 800 G9 Desktop PC, numéro de série CZC2479ZXS - 4G087AV, avec 31 Go de mémoire vive et un processeur 12th Gen Intel® Core™ i7-12700 × 20, ainsi qu'un processeur graphique Mesa Intel® UHD Graphics 770. Il est géré par un système d'exploitation Ubuntu 22.04 64-bits (distribution Linux), sous la version 42.9 de GNOME (GNU Network Object Model Environment) fournissant une interface utilisateur ergonomique pour interagir avec le système d'exploitation GNU (*GNU's Not Unix*). Il est ainsi composé d'un noyau Linux et de GNU, qui ensemble forment le système d'exploitation communément connu sous le nom "Linux". Le système de fenêtrage est "Wayland", un système chargé de l'affichage et du placement des fenêtres durant l'usage du système d'exploitation par l'utilisateur.

2.2 Pratique Professionnelle

2.2.1 Veille bibliographique et technologique

Pour la veille bibliographique, je me suis aidé du script de Web-scraping développé dans le cadre de mon stage, qui, à partir d'un fichier comprenant les titres de nombreux articles cible, m'a permis de récupérer les métadonnées associées de manière semi-automatique. Les journaux consultés (*Applied Soil Ecology, Ecosystems, Soil Biology and Biochemistry*, etc.) étaient majoritairement orientés sur les études écologiques. Un travail par recherche MESH a aussi été réalisé, en retenant les mots-clés **Oligochaetas, Earthworm, Lumbricus terrestris, Ecosystems, Introduced species, Soil, Data mining** et **Meta-Analysis**. Pour gérer cette bibliographie, j'ai employé le package LaTeX *cleveref* conçu dans ce but.

2.2.2 Bonne pratique de programmation informatique et de développement logiciel

Pour l'écriture du code Python, j'ai utilisé l'éditeur de code Visual Studio Code (VScode). Pour la conception du script Rmd, j'ai travaillé sous l'IDE RStudio. Conformément aux bonnes pratiques, l'intégralité des scripts (Python et R) ont été commentés en anglais, pour

faciliter la relecture du code. Pour tester le fonctionnement de chaque script, deux approches différentes ont été mises en place :

Pour le script de Web-scraping en Python, les tests de fonctionnement effectués durant le développement ont été réalisés sur des jeux de données réduits (comprenant le plus souvent seulement les dix premiers articles) afin de pouvoir détecter rapidement si la sortie renvoyée est correcte par rapport à la tâche initiale. Pour la récupération de données via Crossref, des tests ont aussi été réalisés, notamment pour l'exploration des structures JSON renvoyées par la fonction `works()` de l'API. Une fois les données recherchées obtenues en sortie de tests ponctuels, il a été possible de généraliser la méthode, en l'appliquant dans l'ensemble du script principal. Enfin, afin d'éviter la régression du code (perte de fonctionnalité), j'ai souvent travaillé sur deux scripts identiques mais distincts, le premier servant de script principal, tandis que le deuxième était davantage un support pour le développement de nouvelles fonctionnalités. De cette façon, le script principal n'était mis à jour que lorsque le script secondaire était considéré comme fonctionnel. Un dépôt GitHub personnel aurait aussi pu jouer ce rôle, mais comme je travaillais seul sur cette partie, je n'en ai pas ressenti l'utilité.

Pour le script de Text-mining en Rmd sous RStudio, la plupart des tests de fonctionnement au cours du développement ont été réalisés dans la console R directement, afin d'éviter d'ajouter de nouveaux objets inutiles "test" à l'environnement R. Les processus n'ont été intégrés au script Rmd proprement dit qu'une fois leur fonctionnement testé et validé dans la console. Dans cette démarche, le fonctionnement de l'environnement R a été très utile, car cela a permis de réemployer certains objets stockés en mémoire sans avoir à les redéfinir seulement en vue d'effectuer des tests.

2.2.3 Communication des travaux

En concertation avec mes encadrants, j'ai aussi utilisé un dépôt GitHub spécialement mis en place pour le projet entre eux et moi, où mon travail de chaque jour a pu être sauvegardé grâce à un mécanisme de Push/Pull. De cette façon, mes encadrants ont pu facilement suivre l'évolution de mon travail et évaluer la qualité des solutions proposées. Pour faciliter l'utilisation de cet outil, le logiciel GitHub Desktop m'a été présenté, une interface utilisateur graphique facilitant grandement la visualisation et l'usage du dépôt GitHub mis en place pour le projet. Grâce à la fonctionnalité Knitr de Rmd, j'ai pu rendre compte de ma progression quotidienne en produisant automatiquement un fichier rapport au format HTML, directement issu de mon code (figures produites sous R, titres et interprétation rédigées en Markdown ou HTML). Les réunions avec mes encadrants, le plus souvent hebdomadaires, ont été fixées par échange de mails ou bien organisées de vive voix sur site. Elles m'ont permis de rester bien focalisé sur la mission en me fournissant des objectifs hebdomadaires clairs et précis, tout en permettant à mes encadrants d'être régulièrement informés de ma progression par rapport aux objectifs fixés.

2.3 Outils informatiques et statistiques pour les différentes phases de vos travaux

2.3.1 Récupération des abstracts et des métadonnées avec Python

Pour l'élaboration du script Python, j'ai surtout utilisé le package Python Habanero Crossref pour requêter (en utilisant une API) la base de données Crossref, qui contient une grande quantité de métadonnées (données sur les articles en tant que tel, comme l'abstract, les auteurs, etc.), afin de récupérer les informations voulues à propos d'un ensemble de titres

d'articles scientifiques défini au préalable sur le sujet des vers de terre. Pour compléter les données récupérées (la base de Crossref comprenant de nombreuses données manquantes), j'ai aussi développé en parallèle un module pour récupérer les données d'intérêt dans le code source de ResearchGate (web scraping), comme le *DOI* (*Digital Object Identifier*) de chaque publication, la date de chargement sur la base de RG ou encore le lien vers la page RG correspondante. Pour parvenir à cette solution, voici la liste des modules qui ont été utilisés :

Pandas : Pandas est un module qui permet de manipuler facilement des tableaux de données avec des étiquettes de variables (colonnes) et d'individus (lignes). Il est notamment utilisé dans le script pour exporter les résultats issus du code Python vers un fichier CSV (comma separated values), lisible et modifiable à l'aide d'outils de bureautique courants comme LibreOffice Calc ou Excel.

Numpy : Package conçu pour le calcul scientifique avec Python. Il est très utile pour l'algèbre (comme par exemple pour la manipulation de matrices), et son implémentation en C, C++ et Fortran en fait un outil de calcul rapide et efficace pour l'analyse de données et le calcul scientifique. Dans le code, cela sert simplement à l'indexage lors de la création du DataFrame de résultats.

Itertools : Module implémentant des outils Python pour maîtriser plus subtilement les itérations. La méthode employée dans le code est *zip_longest*, qui permet de créer un DataFrame à partir d'une liste de listes de tailles potentiellement différentes. La plus longue sera employée en référence (longest), et toutes les autres seront ajustées à cette longueur par l'ajout d'une *fillvalue* ("null", dans le code). Dans mon travail, elle a servi à créer le DataFrame requis à partir de listes de données de tailles pas forcément égales (à cause des valeurs manquantes).

Habanero : Module client de bas niveau pour interroger l'API Crossref, une base de données contenant les métadonnées des articles de tous les membres (des informations comme le titre, le nom d'auteur, le DOI etc.). Dans le code Python, elle est employée surtout pour rechercher les noms d'auteurs, les autres champs testés n'étant pas assez fiables pour automatiser complètement la récupération d'informations. Crossref est codé comme une **classe** du module Habanero, comprenant les méthodes *works()*, *members()*, *prefixes()*, *funders()*, *journal()*, *type()* et *licence()*. Dans le code Python, seule la méthode *works()* a été employée pour envoyer une requête à partir du titre de chaque article.

Unicodecode : Module contenant entre autres la fonction éponyme *unicodecode* (employée dans le script) conçue pour transformer les chaînes de caractères contenant des caractères non-ASCII (comme par exemple des idéogrammes chinois) pour les traduire en chaînes de caractères contenant uniquement des caractères ASCII. Dans le code, la fonction *unicodecode* est employée pour rendre l'affichage des noms d'auteur contenant des caractères non-ASCII. Certaines corrections sont imparfaites et retirent quelques lettres.

RGS2 : Sous-module codé localement à partir d'un exemple trouvé en ligne¹, par la suite adapté pour récupérer directement les informations voulues dans le code source du site scientifique ResearchGate, les autres options potentielles (comme Google Scholar) ayant souvent un système de détection et de blocage des bots. Seule la deuxième version du sous-module a été retenue dans le projet final. Il dépend des modules suivants :

1. Module **Parsel**, fonction *Selector* : Module facilitant l'extraction des données pour les formats HTML, JSON et XML. Dans le code, il est utilisé pour trouver les données recherchées directement dans le code source de la page (web scraping) en s'appuyant sur des sélecteurs CSS.

1. citation url à mettre ici (scrape publications from RG)

2. Module **playwright.sync_api**, fonction *sync_playwright* : Module permettant de lancer une session navigateur depuis un script Python. Dans le code, il est utilisé pour se rendre sur le site de ResearchGate via une session Chromium, un navigateur libre développé par Google.
3. Module **re** : Module fournissant des opérations sur les expressions rationnelles utilisable dans un code Python. Dans le code Python, il est utilisé pour filtrer les résultats HTML bruts issus du Web scraping.
4. Module **time**, fonction *sleep* : Module fournissant différentes fonctions liées au temps. Dans le script, la fonction "sleep(t)" est utilisée pour forcer le système à ne rien faire pendant t secondes, évitant de cette façon de surcharger le serveur cible de requêtes trop rapides et trop nombreuses.

2.3.2 Text Mining avec R

Pour réaliser le text-mining, j'ai utilisé un script R (développé sous Rstudio en Rmd) pour traiter les textes et l'analyser sous forme de figures. Mon travail a donc consisté à adapter les codes R montrés en exemple sur des livres à mes propres données (abstracts d'articles scientifiques), structurées différemment. Les analyses portaient par exemple sur la fréquence des mots, au global et pour chaque MA, ou encore sur l'analyse de sentiment reposant sur l'attribution d'un score positif (+1) ou négatif (-1) à chaque mot du corpus. Cette attribution de sentiment a pu être réalisée grâce à un dictionnaire R conçu pour relier un token donné à la valence (positive ou négative) qui lui correspond. Afin de mieux visualiser les résultats, différentes figures ont été réalisées, comme des diagrammes en barre ou des nuages de mots. Le script R développé repose sur les librairies suivantes :

Librairie dplyr : Librairie R conçue pour faciliter la manipulation de larges jeux de données (DataFrame et Tibble), avec des fonctions spcialisées comme *mutate* (ajout de variables), *select* (sélectionner les variables à partir de leurs noms), *filter* (filtrer des cellules selon leur valeur), *summarise* (résumer les informations d'un tibble dans un format très synthétique) et *arrange* (pour réordonner les lignes selon l'ordre / la variable voulue.)

Librairie ggplot2 : Librairie R pour créer déclarativement des graphiques divers et variés (barplots, histogrammes, scatter plots, etc.)

Librairie tidytext : Librairie R conçue pour faciliter l'analyse de texte (Silge, Julia, and David Robinson. 2016. "tidytext : Text Mining and Analysis Using Tidy Data Principles in R." ²), se fondant sur le paradigme d'analyse de données "tidy", où chaque variable est une colonne, chaque observation une ligne et chaque ensemble d'observations est un tableau. La fonction la plus utilisée dans le cadre de cette analyse est *unnest_tokens*, qui permet de transformer un texte donné en une tables d'unités textuelles plus réduites (tokens), comme des phrases ou des mots.

Librairie Knitr : Librairie R conçue pour récupérer automatiquement l'output d'un code R (par exemple, pour produire une figure) afin de l'inclure dans un autre document (par exemple, format Word, HTML ou PDF) qui contiendra aussi la prose écrite par l'auteur du document, souvent pour interpréter ou commenter des résultats. Cette librairie permet notamment de moduler plus finement l'affichage des résultats, en permettant par exemple de ne pas afficher certaines figures dans un format de sortie donné (pour masquer une figure interactive au format HTML que l'on ne souhaite pas forcément voir apparaître dans un document PDF, par exemple).

2. ref Silge/Robinson à mettre à la place

Librairie SnowballC : Librairie R implémentant Snowball, un langage conçu pour gérer les chaînes de caractères, les nombres entiers et les booléens. Dans le script R de Text Mining, il a servi à transformer les tokens pour ne garder que la racine de chaque mot (processus de *racination*), afin d'éviter les erreurs de comptage (si, pour un humain, "enhance" et "enhancement" sont deux mots ayant approximativement le même sens, informatiquement ce sont deux chaînes de caractères distinctes).

Librairie grid : Librairie R implémentant les fonctions graphiques primitives qui sous-tendent le package ggplot2. Elles permettent de modifier certains détails des graphes produits grâce à ggplot2, offrant ainsi un meilleur contrôle du rendu visuel du résultat obtenu. Dans le script, il est employé, par exemple, pour spécifier exactement l'aspect des flèches composant le réseau de bigrammes.

Librairie ggraph : Librairie R formant une extension de ggplot2, conçue pour permettre de supporter les structures de données relationnelles comme les réseaux, les graphes et les arbres. Dans le script, elle est notamment employée pour produire les réseaux de bigrammes.

Librairie igraph : fonction `graph_from_data_frame()` : Cette fonction appartient à la librairie igraph. Elle crée un objet graphe à partir d'un data frame, où le data frame représente les arêtes entre les nœuds.

Librairie egg : fonction `ggarrange()` : Librairie servant à organiser différents graphes sur une seule et même figure. Dans le script, c'est l'une des librairies employées pour comparer les quatre MA entre elles.

Librairie tidyr : Librairie R implémentant des méthodes utiles pour manipuler des objets de type "tidy". Elle comprend des fonction telles que `pivot_wider` et `pivot_longer` (pour convertir le dataFrame d'un format à un autre), ou encore `bind_rows()`, pour combiner des DataFrames par lignes.

2.4 Données

L'approche "tidy" choisie repose sur la *tokenisation* du corpus de texte en unités textuelles (appelées "*tokens*") plus petites, comme des mots, des phrases ou des *n-grams*. J'ai pour cela pu m'inspirer du livre rédigé par Julia Slige (data scientist) et David Robinson (Directeur de Data Scientist de la plateforme Heap).³ Afin de filtrer les mots d'intérêt seulement, deux stratégies ont été employées : Premièrement, un filtrage brut de tous les mots de liaisons sans rapport direct avec le sujet (nommés "stop words" en text-mining, des mots tels que "the", "and", "is", "of" etc. en anglais) pour ne conserver que les mots sur lesquels les analyses pourront donner des résultats scientifiques significatifs (savoir que le mot "le" est le plus fréquent dans un corpus de texte français ne signifie rien sur le plan biologique). Deuxièmement, une autre approche a été de considérer la fréquence de chaque mot par rapport au nombre total de mots présents dans le corpus ($n \text{ mot} / N \text{ mots}$). De cette façon, les mots les plus fréquents perdent une partie de leur poids statistique, tandis que les mots plus rares en gagnent. On peut ainsi visualiser facilement les mots les plus importants d'un texte, sans même avoir besoin de modifier les données au préalable avec une liste de stop words. Cela permet de conserver le texte dans son ensemble, évitant ainsi un potentiel biais pouvant perturber l'analyse.

3. disponible en ligne à l'adresse : <https://www.tidytextmining.com/>.

Chapitre 3

Résultats

3.1 Web-scraping et obtention d'une base de métadonnées en format CSV

En sortie du code de Web-scraping développé en Python (et après recherche manuelle des données manquantes), un fichier de métadonnées au format CSV, contenant la métaanalyse d'origine, le titre, les auteurs, l'abstract, la date de publication sur ResearchGate, le DOI et l'URL vers la page RG correspondante a été obtenue (fig. 3.1).

MA	Title	First author	Last author	Abstract	OnResearchGate	DOI	rg_URL
MA1	Influence of exotic earthworm invasion	Amy E Burtelow	Peter M Groffman	Formerly glaciated regions of the northeast	Sep 1998	DOI: 10.1016/S0929-1393(98)00075-4	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Non-native earthworm influences on ecosystems	Erin K. Cameron	Erin M. Bayne	Exotic earthworms are entering previously glaciated regions	Mar 2012	DOI: 10.2980/19-1-3478	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Complementary ability of three European earthworm species	K CHAN	K CHAN	Mechanical incorporation of surface-applied organic matter	Jul 2004	DOI: 10.1016/j.apsoil.2003.12.004	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Amythas agrestis invasion increases soil microbial biomass	Chih-Han Chang	Jeffrey S. Buyer	Earthworm species with different feeding habits	Nov 2017	DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.07.018	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Community-specific impacts of exotic earthworms on soil microbial biomass	Jasmine M. Crumsey	Knute J. Nadelhoffer	Exotic earthworm introductions can alter soil microbial biomass	Dec 2013	DOI: 10.1890/12-1555.1	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Exotic earthworm community composition and soil microbial biomass	Jasmine M. Crumsey	Knute J. Nadelhoffer	Exotic earthworm impacts on temperate forest soil microbial biomass	Dec 2015	DOI: 10.1007/s10533-015-0164-6	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Earthworm-induced shifts in microbial biomass and soil microbial biomass	Alexandre B de Menezes	Peter H Thrall	European earthworms have colonised many temperate forests	Mar 2018	DOI: 10.1093/femsec/fiy051	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Exotic earthworms alter soil microbial biomass	Mark A. Dempsey	Teri C. Balser	Exotic earthworms can profoundly alter soil microbial biomass	Dec 2013	DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.09.009	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	The wave towards a new steady state in soil microbial biomass	Nico Eisenhauer	Lee E. Frelich	Earthworms are ecosystem engineers that alter soil microbial biomass	Oct 2011	DOI: 10.1007/s10530-011-0053-4	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Interactive effects of global warming on soil microbial biomass	Nico Eisenhauer	Peter B. Reich	The spread of exotic earthworms ('worming') in North America	Nov 2011	DOI: 10.1111/j.1600-0706.2011.19807.x	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Invasion of a deciduous forest by earthworms	Nico Eisenhauer	Stefan Scheu	Ecosystems of northern North America exist in a state of invasion	May 2007	DOI: 10.1016/j.soilbio.2006.12.019	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Earthworm effects on the incorporation of organic matter	Timothy J. Fahey	Patrick J. Bohlen	To examine the mechanisms of earthworm effects on soil microbial biomass	Jul 2013	DOI: 10.2307/234416161	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Impacts of invasive Asian earthworms on soil microbial biomass	Holly G. Greiner	Scott D. Tiegs	Background/Question/Methods While invasive earthworms have been shown to produce co	Aug 2010	N/A	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Exotic earthworm invasion and microbial biomass	Peter M. Groffman	Timothy J. Fahey	Invasion of north temperate forest soils by earthworms	Feb 2004	DOI: 10.1007/s10021-003-0129-9	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Earthworms increase soil microbial biomass	Peter M. Groffman	John C. Maerz	Earthworms have been shown to produce co	Apr 2015	DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.03.025	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Effects of European earthworm invasion on soil microbial biomass	Cindy M. Hale	John Pastor	European earthworms are colonizing worm-free forests	Dec 2005	DOI: 10.1007/s10021-005-0066-x	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Exotic earthworm effects on hardwood forest soil microbial biomass	Cindy M. Hale	John Pastor	A greenhouse mesocosm experiment, replicated	Apr 2008	DOI: 10.1007/s10021-007-0925-6	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Cooperation of earthworm and arbuscular mycorrhizal fungi	Xinxing He	Shenglei Fu	Earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi	Jan 2018	DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.10.038	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	The impact of invasive earthworms on soil microbial biomass	Bradley Wayne Jennings	Shaun A. Watmough	Improving current understanding of the factors controlling earthworm invasion	Aug 2016	DOI: 10.1007/s10021-016-9977-y	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Interactions between earthworm burrows and soil microbial biomass	Young-Nam Kim	Nicholas Dickinson	Attempts to restore native biodiversity into invaded ecosystems	Feb 2017	DOI: 10.1016/j.apsoil.2016.10.011	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Influence of nonnative earthworms on soil microbial biomass	Beth Lawrence	Esteban R. Suárez	Exotic earthworms can modify or eliminate native soil microbial biomass	Dec 2002	DOI: 10.1046/j.1469-8137.2003.00649.x	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Influence of earthworm invasion on soil microbial biomass	X Li	X Li	Recent invasion and activity of exotic earthworms	Dec 2002	DOI: 10.1016/S0038-0717(02)00210-9	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Impact of exotic earthworms on soil microbial biomass	Amy Lyttle	Alex Blum	Exotic earthworms are invading forests in North America	Sep 2014	DOI: 10.1007/s10021-014-9809-x	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	The effect of earthworm invasion on soil microbial biomass	April M. Melvin	Christine L. Goodale	Ecosystems of northern North America exist in a state of invasion	May 2007	DOI: 10.1016/j.soilbio.2006.12.019	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Short-term responses of two contrasting soil microbial biomass	M.A. Muir	V. Manoharan	With the renewed interest in the use of coal, earthworms are being introduced	May 2007	DOI: 10.1016/j.soilbio.2006.10.006	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Impacts of invasive earthworms on soil microbial biomass	Sona Psarska	Randall K. Kolka	Invasive earthworms perturb natural forest soil microbial biomass	May 2016	DOI: 10.1007/s11270-016-2885-0	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Effects of non-native Asian earthworms on soil microbial biomass	Jiangxiao Qiu	Monica G. Turner	Effects of invasive European earthworms in North America	Jan 2017	DOI: 10.1007/s10530-016-1264-5	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	The file-drawer problem revisited: A generalization	Michael S. Rosenberg	Michael S. Rosenberg	Quantitative literature reviews such as meta-analyses	Mar 2005	DOI: 10.1554/04-602	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Invasive earthworms interact with abiotic factors	Alexander M. Roth	Peter B. Reich	Common buckthorn (Rhamnus cathartica L.) in North America	Dec 2014	DOI: 10.1007/s00442-014-3175-4	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Indirect and direct effects of exotic earthworms on soil microbial biomass	Tara E. Sackett	Nathan Basiliko	Earthworm invasions in North America: a review	Feb 2013	DOI: 10.1016/j.soilbio.2012.08.015	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Distribution and abundance of exotic earthworms	Matthew L. Bowser	Roman Dial	Little is known about exotic earthworms in North America	Jan 2016	N/A	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Effects of earthworms on nutrient dynamics	Stefan Scheu	Dennis Parkinson	Two experiments were set up to study the effects of earthworms on nutrient dynamics	Jun 1994	DOI: 10.1016/0929-1393(94)90031-0	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Effects of invasion of an aspen forest by earthworms	Stefan Scheu	Dennis Parkinson	Effects of invasion of an aspen forest in the Dec 1994	Dec 1994	DOI: 10.2307/1940899	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Nonlinearity of effects of invasive earthworms on soil microbial biomass	Daniela Straube	Nico Eisenhauer	Invasions of non-indigenous species into North America	Jun 2009	DOI: 10.1111/j.1600-0706.2009.17405.x	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Effects of exotic earthworms on soil microbial biomass	Esteban R. Suárez	Melany C. Fisk	We compared the biogeochemical cycling of earthworms	Feb 2004	DOI: 10.1007/s10021-003-0128-x	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Spatial and temporal dynamics of exotic earthworms	Esteban R. Suárez	Patrick J. Bohlen	The invasion of North American forests by earthworms	Jun 2006	DOI: 10.1007/s10530-005-1196-y	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Resident plant diversity and introduced earthworms	Timothy J. S. Whitfield	Peter B. Reich	Theoretical predictions and empirical studies of earthworm effects	Oct 2014	DOI: 10.1007/s10530-014-0657-6	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Exotic earthworm invasion increases soil microbial biomass	M Wironen	T R Moore	To test whether invasion of exotic earthworms affects soil microbial biomass	Apr 2006	DOI: 10.1139/X06-016	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Land use history determines non-native earthworm biomass	Joseph B. Yavitt	Joseph B. Yavitt	Soils in temperate forests consume atmospheric CO2	Aug 2013	N/A	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Earthworms facilitate carbon sequestration	Weixin Zhang	Shenglei Fu	A recent review concluded that earthworms facilitate carbon sequestration	Oct 2013	DOI: 10.1038/ncomms3576	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA1	Belowground organism activities affect soil microbial biomass	Manuel Blouin	Patrick Lavelle	Soil fauna activities are probably more important for soil microbial biomass	Feb 2005	DOI: 10.1111/j.1461-0248.2004.00711.x	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA2	Earthworms as drivers of the competitive exclusion principle	Valerie Eviner	Valerie Eviner	Grasses and legumes are grown together in North America	Oct 2008	DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.07.010	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA2	Plant-mediated effects of soil invertebrates on soil microbial biomass	Scott N. Johnson	Susan E. Hartley	1. We conducted a large-scale field study to test the effects of earthworms	Dec 2010	DOI: 10.1111/j.1365-2745.2010.01748.x	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA2	Plant mediated effects of earthworms on soil microbial biomass	Christian Körner	Christian Körner	The individual and combined effects of earthworms on soil microbial biomass	Dec 2014	DOI: 10.1186/s12898-014-0025-5	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA2	Earthworms, Collembola and residue decomposition	Xin Ke	Stefan Scheu	Management practices of arable systems deplete soil microbial biomass	Oct 2008	DOI: 10.1007/s00442-008-1106-y	https://www.researchgate.net/publication/234416161
MA2	After-life effects: living and dead earthworms	Martine Kos	T. Martijn Bezemer	Above-belowground (AG-BG) studies typically show that earthworms	Oct 2016	DOI: 10.1111/oik.03734	https://www.researchgate.net/publication/234416161

FIGURE 3.1 – Impression écran montrant les 46 premières lignes du fichier CSV issu du Web-scraping et employé comme base de données pour la suite des analyses.

- 3.2 Présentation de la démarche et analyse des textes bruts
- 3.3 Analyse de sentiment
- 3.4 Approche tf-idf et loi de Zipf
- 3.5 Analyses de bigrammes seuls
- 3.6 Réseaux de bigrammes

Chapitre 4

Discussion

Au cours de ce stage, j'ai commencé par développer un programme Python pour le web scraping sur la base de données médicale PubMed, avant de découvrir que ce n'était pas selon dont nous avions besoin. J'ai donc réussi à m'adapter pour faire fonctionner mon code (en interrogeant une autre base de données), mais il reste encore à nettoyer les données extraites par le code (collectées directement en brut dans un fichier CSV généré par le script). Rétrospectivement, je ne suis pas certain que cette approche automatisée soit vraiment rentable en temps, même si je suis satisfait d'avoir commencé à apprendre comment développer ce type d'approches automatisées.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Chapitre 5

Conclusion

Elle vise, à reformuler les objectifs visés, énoncer les résultats essentiels obtenus, à replacer le travail dans son contexte scientifique et à faire ressortir leur importance théorique, pratique, technique ou économique. Elle peut ouvrir de nouvelles perspectives ou hypothèses qui seront le point de départ de nouveaux travaux. Il n'y a pas a priori d'appel à des références.

Bibliographie

- [1] Michel Bertrand, Sébastien Barot, Manuel Blouin, Joann Whalen, Tatiana de Oliveira, and Jean Roger-Estrade. Earthworm services for cropping systems. a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2) :553–567, January 2015.
- [2] Patrick J. Bohlen, Stefan Scheu, Cindy M. Hale, Mary Ann McLean, Sonja Migge, Peter M. Groffman, and Dennis Parkinson. Non-native invasive earthworms as agents of change in northern temperate forests. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(8) :427–435, October 2004.
- [3] Clive A. Edwards and Norman Q. Arancon. *The Role of Earthworms in Organic Matter and Nutrient Cycles*, page 233–274. Springer US, 2022.
- [4] Olga Ferlian, Nico Eisenhauer, Martin Aguirrebengoa, Mariama Camara, Irene Ramirez-Rojas, Fábio Santos, Krizler Tanalgo, and Madhav P. Thakur. Invasive earthworms erode soil biodiversity : A meta-analysis. *Journal of Animal Ecology*, 87(1) :162–172, September 2017.
- [5] Oswaldo Forey, Joana Sauze, Clément Piel, Emmanuel S. Gritti, Sébastien Devidal, Abdelaziz Faez, Olivier Ravel, Johanne Nahmani, Laly Rouch, Manuel Blouin, Guénola Pérès, Yvan Capowiez, Jacques Roy, and Alexandru Milcu. Earthworms do not increase greenhouse gas emissions (co₂ and n₂o) in an ecotron experiment simulating a three-crop rotation system. *Scientific Reports*, 13(1), December 2023.
- [6] Young-Nam Kim, Brett Robinson, Keum-Ah Lee, Stephane Boyer, and Nicholas Dickinson. Interactions between earthworm burrowing, growth of a leguminous shrub and nitrogen cycling in a former agricultural soil. *Applied Soil Ecology*, 110 :79–87, February 2017.
- [7] Rahul Kumar, Renu Yadav, Rajender Kumar Gupta, Kiran Yodha, Sudhir Kumar Kataria, Pooja Kadyan, Pooja Sharma, and Simran Kaur. The earthworms : Charles darwin’s ecosystem engineer. In Khalid Rehman Hakeem, editor, *Organic Fertilizers*, chapter 13. IntechOpen, Rijeka, 2023.
- [8] Aboulkacem Lemtiri, Gilles Colinet, Taofic Alabi, Daniel Cluzeau, Lara Zirbes, Eric Haubruge, and Frédéric Francis. Impacts of earthworms on soil components and dynamics. a review. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement / Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, November 2014.
- [9] Scott R. Loss, Ryan M. Hueffmeier, Cindy M. Hale, George E. Host, Gerald Sjerven, and Lee E. Frelich. Earthworm invasions in northern hardwood forests : a rapid assessment method. *Natural Areas Journal*, 33(1) :21–30, January 2013.
- [10] Ingrid M Lubbers, Kees Jan Van Groenigen, Steven J Fonte, Johan Six, Lijbert Brussaard, and Jan Willem Van Groenigen. Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms. *Nature Climate Change*, 3(3) :187–194, 2013.

- [11] D. K. Sharma, S. Tomar, and D. Chakraborty. Role of earthworm in improving soil structure and functioning. *Current Science*, 113(6) :1064–1071, 2017.

Résumé

à faire à la fin

Mots-clés de référencement type MESH : Lumbricus terrestris, Soil, Ecosystem, Introduced species, Meta-Analysis.

Mots-clés des acquis techniques : Web-scraping, Text-mining, dplyr, R Markdown, GitHub.