Evolution de la MO dans les sols audois : résilience face au changement climatique. Cartographie de la base de données du laboratoire des sols et ébauche d'une stratégie départementale de redressement des taux de MO.

Stage mission Master 1 ingénieur agronome

Structure d'accueil

Chambre d'Agriculture de l'Aude Pôle Eau et Agronomie ZA Sautès, 11878 Carcassonne Cedex 9

Maitre de stage

Stéphanie Rubio Chargée de mission animation MESE plans d'épandage Pôle Eau et Agronomie

Enseignant tuteur

Didier Michot
Enseignant chercheur
UMR INRAé/Agrocampus 1069 SAS – Sol Agrosystème Spatialisation







CARADEC Lucille

Stage du 7 septembre 2020 au 5 février 2021

Résumé

La matière organique est de plus en plus perçue comme un indicateur incontournable de la santé et de la qualité des sols. Dans une démarche d'adaptation au changement climatique dans un territoire méditerranéen, nous nous intéressons à l'évolution de la matière organique des sols audois en tant que levier d'adaptation. Les méthodes de suivi à grande échelle des sols sont très couteuses, mais une approche alternative est possible en mobilisant la base de données du laboratoire d'analyse de sols de la Chambre d'Agriculture de l'Aude. Durant mon stage, nous avons développé des méthodes pour cartographier l'évolution départementale de la matière organique à partir de la base de données, avec une dimension quantitative et qualitative de la matière organique.

Ensuite, nous avons travaillé sur le développement d'outils simplifiés pour permettre aux conseillers de prendre en main la base de données et l'utiliser à des fins de cartographie. En outre, lors de l'exploitation de la base de données, la pertinence des référentiels agronomiques a été remise en cause car ne reflétant pas les paysages méditerranéens et ne prenant pas en compte la texture des sols. Nous avons donc développé un outil permettant de comparer les sols à la base de données, sur la base de leur texture, leur localisation, etc.

Enfin, nous avons ébauché une stratégie de redressement des sols du département, sur la base de gisements locaux de matière organique. Nous avons travaillé sur l'identification quantitative et qualitative de ces gisements, ainsi que la mise en place de plateformes de compostage à la ferme avec différents partenaires : collectivités territoriales, professionnels du déchet, prestataires...

Abstract

Organic matter is increasingly seen as a staple indicator of soil health and quality. As we study ways to adapt to climate change in a Mediterranean environment, we focused on the evolution of the soil organic matter in the Aude department, as a mean of adjustment. Large-scale soil surveying methods are complicated and expensive to carry through, which is why we resorted to an alternative approach using the soil test database of the soil test laboratory of the Chamber of Agriculture. We implemented methods to capitalize on the database in order to map the departmental evolution of the soils, with a quantitative and qualitative approach of soil organic matter.

We then developed user-friendly tools for counselors of the Chamber to use, allowing them to use the database for cartography purposes. Furthermore, while working on the characterization of the department, we began to question the relevance of traditional agricultural reference systems, as they do not apply to Mediterranean landscapes and do not take soil texture into account. Thus, we developed another tool allowing technicians and counselors to compare soil analyses to the database filtered by texture, location, and so on.

Lastly, we drafted a departmental plan to correct soil organic matter, using only local organic matter deposits. We identified both the quantity and quality of such deposits, and went on with meeting main players who would be involved in implementing on-farm composting projects: public authorities, waste management companies, service providers...

Table des matières

List	e c	des abréviations	3				
Inti	Introduction4						
I.	C	Contexte du stage	5				
1	L.	La chambre d'agriculture de l'Aude	5				
2	2.	Productions, pédopaysages et climats de l'Aude	5				
3	3.	Changement climatique dans le département et groupe projet	7				
II.	C	Cartographie de la base de données	8				
1	L.	Présentation du laboratoire d'analyse de sols	8				
2	2.	Etat des lieux sur la cartographie des sols	9				
3	3.	Méthodes	10				
2	1.	Résultats et discussions	11				
III.		Réalisation d'outils à destination des conseillers	14				
1	L.	Objectifs	14				
2	2.	Outil de cartographie	14				
3	3.	Outil d'interprétation des analyses de sol	15				
2	1.	Perspectives	16				
IV.		Ebauche d'un plan d'action départemental de redressement de la matière organiq 17	ue des sols				
1	L.	Enquête de terrain sur les gisements de matière organique du département	17				
2	2.	Caractérisation agronomique des différents amendements organiques	19				
3	3.	Choix de secteurs sur lesquels mener l'action sols	21				
4	1.	Perspectives	22				
Cor	ncli	usion	24				
Bib	lio	graphie	25				
Autres nackages Rutilisés non cités dans le teyte							

Liste des abréviations

ASA: Association Syndicale Autorisée

BD CA11 : Base de données du laboratoire d'analyse de sols de la Chambre d'Agriculture de l'Aude

BDAT : Base de Données d'Analyses de Terre

C: Carbone

CA: Chambre d'Agriculture

CRA: Chambre Régionale d'Agriculture

CEC: Capacité d'échange cationique

ETM : Eléments Traces Métalliques

FAO: Food and Agriculture Organisation

Gis sol: Groupement d'Intérêt Scientifique sur les sols

IGCS: Institut de Gestion et Conservation des Sols

INRA: Institut National pour la Recherche Agronomique

ISB: Indice de Stabilité Biologique

ISMO: Indice de Stabilité de la Matière Organique

MESE: Mission Expertise et Suivi des Epandages

MO: Matière Organique

N: Azote

RMQS : Réseau Mixte de Qualité des Sols

SAU: Surface Agricole Utile

SMMAR : Syndicat Mixte des Milieux Aquatiques et des Rivières

Introduction

Autrefois considéré comme un simple support de culture, le sol prend désormais une place croissante dans l'agronomie, dans les pratiques agricoles et dans l'imaginaire collectif. Il n'existe pas d'agriculture résiliente et durable sans une bonne santé des sols : le sol n'est plus un support de culture et devient un véritable outil de travail, qu'il faut chercher à comprendre et qu'il faut entretenir. En réponse à cette demande, les sciences du sol évoluent et s'intéressent à la vie du sol, le moteur d'un sol en bonne santé.

De plus, dans une démarche de réduction des gaz à effet de serre les regards se tournent vers les sols, qui sont désormais considérés comme des formidables puits de carbone, et pour cause : les sols contiennent deux à trois fois plus de carbone que l'atmosphère. C'est notamment le leitmotiv de l'initiative 4 pour mille, lancée à la COP21 : en augmentant la teneur en carbone de 4g/kg à l'échelle mondiale, on pourrait absorber toutes les émissions de CO₂ d'une année ... ou alors, si on prend le problème à l'envers : si on ne protège pas les sols, et si on provoque ainsi une réduction de 4‰ du carbone des sols, on doublera la quantité de carbone émise dans l'atmosphère.

Cependant, le stockage de carbone dans les sols n'est pas si facile à mettre en place, et nécessite une connaissance approfondie du territoire : quelles problématiques sur les sols, quels gisements, quelle qualité des amendements ? Si on veut que l'augmentation de la teneur en carbone des sols soit une entreprise vertueuse, il faut mener une réflexion sur tout le système de production et limiter au maximum les externalités négatives. C'est là que la cartographie a toute sa place : elle permet de représenter toute la complexité d'un territoire sous une forme concise et facilement compréhensible pour le néophyte.

La cartographie est d'autant plus pertinente pour approcher un enjeu fortement spatialisé comme le sol. C'est pourquoi les approches de SIG sont de plus en plus intégrées aux sciences du sol, au point d'en former une branche à part entière. La chambre d'Agriculture de l'Aude dispose de son propre laboratoire d'analyses de sol, qui compile une base de données départementales sur la qualité des sols depuis plusieurs décennies. Cette base de données n'avait jamais été exploitée auparavant, et il était nécessaire de développer une approche permettant à la Chambre de se réapproprier la base de données comme un puissant outil d'analyse du territoire.

Durant mon stage, j'ai d'abord travaillé sur l'exploitation de la base de données du laboratoire d'analyse de sols, pour caractériser l'évolution des sols Audois : quels secteurs ont les sols les plus dégradés biologiquement ? Comment les sols évoluent ? Par la suite, j'ai développé des approches simples et accessibles pour que les conseillers de la Chambre puissent exploiter la base de données sans avoir besoin de maitriser des méthodes de traitement informatique. Une fois un état des lieux réalisé sur l'évolution du département et les secteurs les plus pauvres en matières organiques, il était temps de développer une stratégie de redressement des teneurs en matière organique. Nous avons donc travaillé avec différents acteurs pour dresser un diagnostic des gisements en matière organique sur le département et mettre en place des stratégies locales de redressement de taux de matière organique, adaptées aux territoires.

I. Contexte du stage

1. La chambre d'agriculture de l'Aude

La Chambre d'Agriculture de l'Aude est une chambre consulaire et une entreprise de services. Elle intervient auprès de plusieurs acteurs du monde agricole : conseil auprès des agriculteurs, expertise auprès des instances gouvernementales (DREAL, DDTM), accompagnement des entreprises agricoles (coopératives) et représentation du monde agricole au sein des collectivités territoriales.

La Chambre d'Agriculture de l'Aude compte une centaine de conseillers, répartis dans 7 pôles : trois pôles filières (Viticulture-Œnologie, Elevage et Polyculture) et quatre pôles transversaux (Eau-Agronomie, Développement Territorial, Entreprises et Administratif et Financier). J'ai effectué mon stage dans le pôle Eau-Agronomie avec Stéphanie Rubio, chargée de mission MESE (Mission d'Expertise et de Suivi des Epandages).

L'eau est un enjeu important dans l'Aude et concerne de nombreux acteurs : agriculteurs, syndicats de l'eau (le SMMAR et de nombreuses ASA), collectivités territoriales (gestion des inondations, etc) et instances gouvernementales (Agence de l'Eau, DDTM). De ce fait, le pôle Eau est un pôle influent au sein de la Chambre d'Agriculture. Une particularité du pôle Eau est qu'il est financé en grande partie par un accord-cadre avec l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. Les missions du pôle Eau sont :

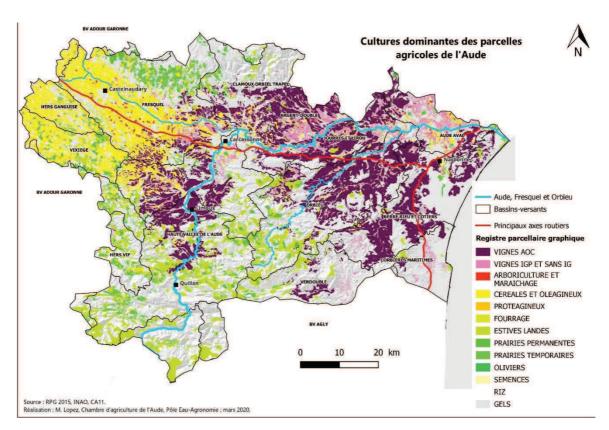
- La gestion quantitative de l'eau : gestion quantitative Est-Audois, suivi des projets d'irrigation, morphologie des cours d'eau.
- La gestion qualitative de l'eau : MESE, aires de lavage, pesticides, captages prioritaires.
- Le laboratoire d'analyse de sols : analyse et expertise sur les sols (fertilisation, plantation, diagnostic de carences).

2. Productions, pédopaysages et climats de l'Aude

Productions

L'Aude est un département situé dans la région Occitanie, d'une superficie de 6139 km². C'est un département rural, les surfaces agricoles représentent 36% du département (près de 225000 ha de SAU au total). L'agriculture audoise est majoritairement viticole avec 64 000 ha de vignes, des coteaux du Razès aux plaines Narbonnaises, en passant par les massifs des Corbières et du Minervois. Vers l'Ouest le paysage évolue vers les grandes cultures propres au Lauragais ; dans la Haute Vallée de l'Aude et dans la Montagne Noire l'élevage bovin allaitant extensif domine. La carte figure 1.1 présente les différentes productions de l'Aude.

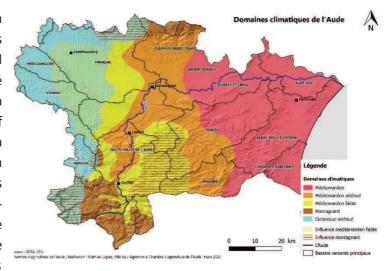
La viticulture est majoritaire avec plus de deux exploitations sur trois, et représente 63% de la valeur de la production agricole en 2015. Avec une dizaine d'AOC, l'Aude occupe également une place importante dans la production des IGP, représentant 20% des volumes au niveau national. Les grandes cultures représentent 11% de la valeur produite, avec une production majoritairement tournée vers le blé dur, le tournesol et la production de semences. L'élevage représente une part faible de la production agricole mais joue un rôle important dans l'architecture du territoire en limitant l'enfrichement des territoires menacés par la déprise et en entretenant des prairies naturelles dans des territoires sensibles aux feux de forêts.



<u>Figure 1.1</u> : Culture dominantes des parcelles en 2015 <u>Source</u> : Chambre d'Agriculture de l'Aude, mars 2020

Relief et climat

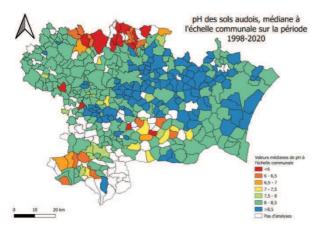
Le département de l'Aude tire son nom du fleuve qui le traverse, ses affluents principaux sont le Fresquel et l'Orbiel. Le département est situé entre la chaîne des Pyrénées au Sud, la Méditerranée à l'Ouest et le massif des Cévennes au Nord, annoncé par la Montagne Noire. Ce relief forme un couloir propice à des vents parfois violents: des vents venants du Nord-Ouest, froids et secs, qui aggravent le phénomène de sécheresse en été. Le climat est plutôt méditerranéen vers l'Est, et évolue rapidement vers un climat océanique vers l'Ouest du département (voir figure 1.2)



<u>Figure 1.2</u> : Climats dominants dans l'Aude <u>Source</u> : Chambre d'Agriculture de l'Aude, mars 2020

Par son paysage très contrasté, le département est sensible aux évènements extrêmes : épisodes méditerranéens menant parfois à des inondations, sécheresse, grêle, tempêtes, feux de forêt, érosion et glissements de terrain. L'agriculture audoise a toujours été soumise à ces évènements et a su en tirer parti, mais les évènements extrêmes sont susceptibles d'augmenter en fréquence et en intensité au cours des décennies à venir à cause du changement climatique.

Pédologie



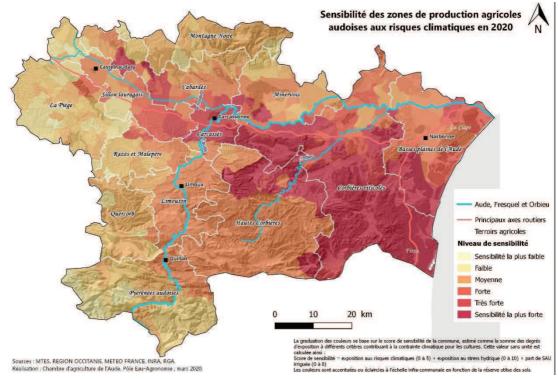
<u>Figure 1.3</u> : pH médian par commune sur la période 1998-2020

<u>Source</u>: BD sols CA11, réalisation Lucille Caradec

La majorité du département est situé sur un socle calcaire, avec quelques veines de schiste. Ce socle calcaire se traduit par des sols avec un pH très élevé sur la majorité des communes, comme on peut le voir sur la figure 1.3. Les sols ont une texture assez équilibré, avec des sols plus sabloargileux sur l'embouchure de l'Aude. Le fleuve est également responsable d'un apport de matières organiques et de limons plus ou moins important selon les crues, avec une moyenne d'un mètre de limons par siècle. Dans l'Ouest les sols ont une texture limoneuse plus marquée, ce qui les rend plus sensibles à l'érosion.

3. Changement climatique dans le département et groupe projet

La Chambre d'Agriculture de l'Aude, dans le cadre de l'action CLIMA-XXI (Climat et Agricultures au XXIème siècle), a lancé une étude départementale des risques et effets du changement climatique sur les productions audoises. Cette initiative étudie la sensibilité départementale aux différents aléas climatiques en 2020 : inondations, mouvements de terrain, feux de forêts, submersions marines, érosion côtière et tempêtes (Lopez 2020). La figure 1.4 nous présente un indicateur évaluant la sensibilité globale du département à ces risques climatiques, mais il faut cependant noter que cet indicateur ne prend pas en compte les trois derniers aléas climatiques (trop peu documentés pour



<u>Fiqure 1.4 :</u> Sensibilité des zones de production agricoles audoises aux risques climatiques en 2020. Projection obtenue avec le modèle CLIMA-XXI (Climat et Agricultures au XXIème siècle), développé par la Chambre d'Agriculture Occitanie Source : Chambre d'Agriculture de l'Aude, mars 2020

l'instant). On peut également noter sur cette carte le nom des différents territoires de l'Aude, auxquels nous allons nous référer plus tard dans ce rapport.

Cet indicateur multicritères met en évidence certains territoires particulièrement exposés aux aléas climatiques : le Carcassès, les basses plaines de l'Aude et les Corbières viticoles. L'enjeu climatique le plus important est le stress hydrique, d'autant plus prononcé dans les Corbières viticoles où les sols très superficiels et caillouteux retiennent peu d'eau, et où aucun accès à l'eau n'est possible pour certaines communes.

Une fois cet état des lieux réalisé, différents groupes de travail se sont formés au sein de la Chambre d'Agriculture de l'Aude pour travailler autour de l'adaptation au Changement Climatique. Parmi ceuxci, une mission « Sols » a été créée. Celle-ci a pour objectif de définir une stratégie collective d'accompagnement de redressement de la MO des sols par des amendements organiques adaptés. En effet, une amélioration quantitative et qualitative de la MO des sols audois pourrait être une des réponses possibles face à l'adaptation et l'atténuation du CC. De plus, une augmentation des taux de MO des sols s'inscrit dans les objectifs du projet « 4 pour mille » qui vise à stocker du carbone dans les sols pour compenser les émissions de gaz à effet de serre.

II. Cartographie de la base de données

1. Présentation du laboratoire d'analyse de sols

La Chambre d'Agriculture de l'Aude dispose de son propre laboratoire d'analyse de sols, une particularité dans le réseau national des Chambres d'Agriculture. Ce laboratoire réalise des prestations à la demande des agriculteurs et intervient dans des contextes réglementaires (par exemple l'estimation des reliquats d'azote et de taux d'argile pour les zones vulnérables) ou dans des projets portés par la Chambre ou les structures coopératives.

Le laboratoire est agréé par le Ministère de l'Agriculture et est membre du BIPEA, un réseau de contrôle des réseaux inter-laboratoire pour assurer la qualité de ses analyses. Lorsque les agriculteurs font appel au laboratoire, ils ont le choix entre plusieurs menus d'analyses suivant leurs besoins. Les échantillons sont généralement prélevés par les agriculteurs eux-mêmes puis envoyés au laboratoire. Là, ils sont tamisés à 5mm et passés à l'étuve avant d'être divisés en plusieurs échantillons pour les différents protocoles d'analyse.

La base de données fournie par le laboratoire d'analyse de sols compile toutes les analyses effectuées par le laboratoire depuis 1990, cela représente environ 28 000 analyses. La majorité des analyses dans la base ont été effectuées après 1998. En effet, une grande partie des analyses ont été perdues lors de la numérisation des archives du laboratoire. Nous serons donc contraints de travailler uniquement après 1998.

Le laboratoire d'analyse de sols travaille en partenariat avec la Base de Données d'Analyses de Terre (BDAT) de l'unité Infosols de l'INRAé Orléans. Cette unité recueille les données des laboratoires d'analyse de sols pour en déduire des grandes tendances nationales. Nicolas Saby, de l'unité Infosols, m'a été d'une grande aide durant mon stage en me conseillant sur les méthodes d'analyses à utiliser. Par ailleurs, une partie des données « perdues » par le laboratoire de la Chambre d'Agriculture de l'Aude (les données antérieures à 1998) ont pu être retrouvées grâce à la BDAT qui les avait stockées.

2. Etat des lieux sur la cartographie des sols

La pédologie a toujours été une composante importante de l'agronomie, en tant que science qui étudie le développement des plantes cultivées en fonction de leur milieu. L'étude du sol a pris une importance croissante tout au cours du XXe siècle, poussée par des évènements traumatiques comme le Dust Bowl aux Etats Unis (McLeman et al. 2014) ou par des avancées scientifiques comme le développement des engrais minéraux. La pédologie est une discipline au carrefour de plusieurs sciences : biochimie, physique, géologie, écologie... Pour représenter la pédologie d'un territoire, le recours à des approches cartographiques est incontournable : les cartes permettent de décrire la complexité d'un territoire de façon concise et de représenter de nombreux éléments de natures différentes.

On voit alors le développement de structures nationales de cartographie des sols. En France, on peut citer l'IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols), le RMQS (Réseau Mixte de Qualité des Sols) et la BDAT. Ces trois organismes s'appuient sur des démarches différentes pour la cartographie des sols, et les cartes réalisées ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients. Ces trois initiatives sont coordonnées au sein du Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (Gis sol) qui développe une expertise transdisciplinaire sur les sols de France (Gis Sol 2011).

L'IGCS est un programme coordonnant différents instituts de recherche en France pour établir une cartographie multi-échelle des principaux pédopaysages de chaque territoire et identifier les enjeux propres à chaque territoire(Laroche, Schnebelen 2011). Les cartes de l'IGCS sont une appréciation qualitative des pédopaysages et décrivent de grands ensembles stables dans le temps. On peut ainsi citer le référentiel des pédopaysages de l'Aude (J.P. Barthès, M. Bornand, P. Falipou 1999) qui décrit les grands ensembles du département et qui sert de base à de nombreux projets d'évaluation du territoire.

Le RMQS est un programme à long terme de suivi de l'évolution des sols, qui échantillonne les sols de France tous les 15 ans selon un quadrillage de 16 km de côté (Gis Sol 2020). Le RMQS réalise une appréciative quantitative de différents indicateurs de santé des sols, avec un échantillonnage très fin mais également très contraignant et coûteux. Les données recueillies permettent la réalisation de cartes de grande précision comme celle présentée par Chen et al. dans leur étude du potentiel de séquestration en carbone des sols français (Chen et al. 2018).

La BDAT, présentée précédemment, établit des cartes de France avec un découpage cantonal et départemental à partir des données collectées par les laboratoires d'analyse de sols (Arrouays et al. 2002). Ces cartes sont disponibles en ligne sur l'outil Geosols. La BDAT peut réaliser des cartes pour un coût modique (puisqu'il n'y a pas de campagne d'échantillonnage à déployer) et permet de représenter une variation temporelle des données. Par contre, les cartes présentent un certain nombre de biais (irrégularité d'échantillonnage dans le temps et l'espace, surreprésentation de certaines exploitations plutôt que d'autres...) contre lesquels des cadres statistiques ont été développés. La BDAT a servi de base à des travaux comme l'évaluation de la teneur en phosphates des sols bretons (Lemercier et al. 2008) ou l'étude de corrélations entre la texture du sol et la teneur en carbone organique (Arrouays et al. 2006).

Malgré le peu de projets de cartographie développés dans l'Occitanie et dans le département de l'Aude, il existe de nombreuses méthodes pour traiter les bases de données issues de laboratoire de sols. Nous détaillerons par la suite lesquelles nous avons choisies et adapté à notre contexte. Les

méthodes et résultats décrits ici ne sont qu'une petite partie de tous les travaux qui ont été menés sur la base de données.

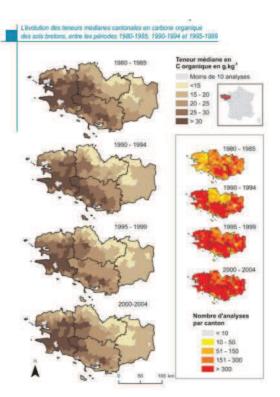
3. Méthodes

Evolution de la matière organique

Nous avons commencé par cartographier l'évolution de la matière organique en nous inspirant de la carte développée par Walter et al. (Walter, Bouedo, Aurousseau 1995), présentée en figure 2.1. Comme eux, nous avons choisi de travailler à l'échelle cantonale plutôt que communale pour lisser les irrégularités d'échantillonnage, augmenter significativité statistique, faciliter la lecture préserver l'anonymat des agriculteurs dans les petites communes. Nous avons choisi de représenter des périodes de 7 ans plutôt que 5 ans pour améliorer la couverture spatiale. Ensuite, pour chaque période nous avons calculé la médiane cantonale de MO. Tout le traitement statistique a été possible grâce à de nombreux packages R cités en fin de rapport, dont le plus important a été tidyverse (Wickham et al. 2019).

Autres indicateurs agronomiques

Cette méthode a été reproduite pour d'autres indicateurs agronomiques : C/N et coefficient de



<u>Figure 2.1</u> : évolution de la MO des sols de Bretagne <u>Source :</u> Gis sol (2011), Synthèse sur l'état des

sols de France.

minéralisation (k2). Le coefficient de minéralisation a été calculé selon la formule de Girard et al actualisée pour le Languedoc-Roussillon (Girard et al. 2011) :

$$k_2 = \frac{(0.6 \times t - 3)}{(1 + 0.05 \times A) \times (100 + 0.015 \times CaCO_3)}$$

où t représente la température moyenne annuelle à Carcassonne, A représente la teneur en argile (fraction < 2 µm) en % et $CaCO_3$ représente la teneur en calcaire total en g/kg. On calcule la médiane cantonale sur toute la période 1998-2020 puisque la teneur en argile et la teneur en calcaire total sont stables dans le temps (puisque les sols du département sont sur un socle calcaire).

Approfondissement du traitement statistique

Nous avons également utilisé la méthode décrite par Saby et al. pour évaluer l'évolution de la MO avec des tests statistiques (Saby et al. 2017). Pour chaque canton, on teste la normalité des échantillons sur 1998-2004 et 2013-2019 (avec un test de Shapiro-Wilk), puis nous avons comparé les deux périodes avec un test de Student (si l'échantillon était normal) ou de Wilcoxon-Cox (si l'échantillon ne suivait pas une loi normale). Nous avons ainsi testé trois hypothèses alternatives H1 : la MO varie, la MO augmente et la MO diminue. Nous avons ensuite sélectionné l'hypothèse H1 associée à la p-value la plus faible (avec un seuil alpha = 0.05) puis nous avons cartographié le résultat des tests.

Potentiel de stockage de matière organique

Nous avons ensuite étudié le potentiel de stockage en carbone du département à partir de la formule développée par J. Hassink :

$$C_{sat} = 4.09 + 0.37 \times particules fines$$

où C_{sat} est le taux de saturation du sol en carbone et *particules fines* représente la fraction du sol < 20µm (en %) (Hassink 1997). On cherche à estimer le remplissage de ce potentiel par le carbone organique du sol, on va appliquer la formule suivante :

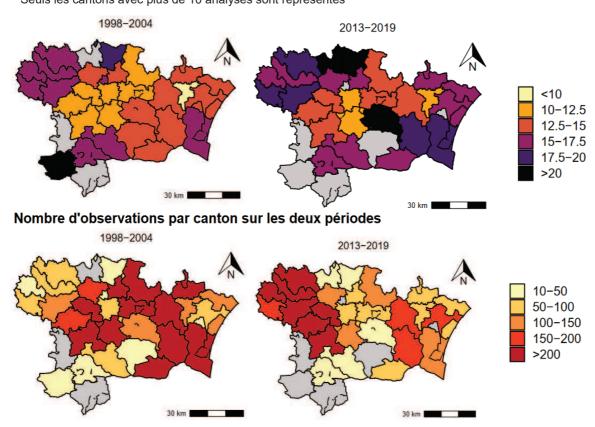
$$Remplissage = \frac{0.85 \times C}{C_{sat}}$$

où C est le carbone mesuré lors de l'analyse de sol et C_{sat} est le taux de saturation calculé précédemment. Comme décrit par Chen et al (Chen et al. 2018), on prend en compte uniquement la fraction fine du carbone, qui représente 85% du carbone total mesuré par l'analyse de sol (Angers et al. 2011). Nous avons ensuite calculé la médiane de remplissage pour chaque canton et pour les périodes 1998-2004 et 2013-2019.

4. Résultats et discussions

Evolution de la matière organique

Médiane cantonale de matière organique en g/kg, sur l'horizon 0-30 cm Seuls les cantons avec plus de 10 analyses sont représentés



<u>Figure 2.2 :</u> évolution de la matière organique des sols audois. Source : BD sols CA 11, réalisation : Lucille Caradec

La figure 2.2 présente l'évolution de la matière organique dans l'Aude entre 1998 et 2019. On remarque tout d'abord que l'échantillonnage est assez différemment réparti entre les deux périodes, ce qui nous incite à être particulièrement prudents dans nos conclusions. De plus, les zones d'élevage (décrites dans la partie I.2) ont une densité d'échantillonnage très faible, donc il n'est pas pertinent de tirer des conclusions sur l'évolution des taux de MO dans ces sols. Le choix de la médiane comme

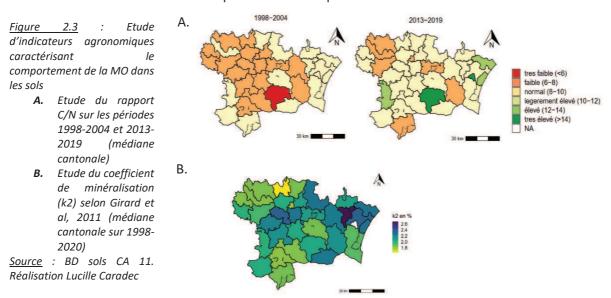
indicateur global est plus conservateur que la moyenne et moins sensibles aux valeurs extrêmes, cependant il ne représente pas la variabilité globale de la matière organique. On pourrait par exemple choisir de représenter les quantiles 1, 25, 50, 75 et 99 pour chaque période pour avoir une vision plus juste de la variabilité réelle de la matière organique.

On observe que la matière organique est globalement en augmentation sur la majorité des cantons du département. Le taux de MO est plus élevé sur les zones de grandes cultures (l'Ouest du département) que sur les zones viticoles, avec une teneur comprise entre 15 et 20 g/kg sur la période 2013-2019. Bien que la teneur en MO soit en augmentation, cela reste un taux très bas pour les grandes cultures. Pour les zones viticoles, le taux de MO est plus variable selon les terroirs, il varie de 10-12.5 g/kg pour le Razès et le Carcassès à 17.5-20 g/kg pour les Corbières viticoles et le Fitou.

Cette augmentation des taux de MO peut notamment être attribuée à des changements de pratiques comme la transition vers du labour plus superficiel ou le développement des couverts végétaux et l'enherbement inter-rangs en vigne. Cependant, la teneur en MO reste très faible par rapport au reste de la France et une augmentation de cette teneur pourrait contribuer à rendre l'agriculture Audoise plus résiliente face au changement climatique.

Etude d'autres indicateurs

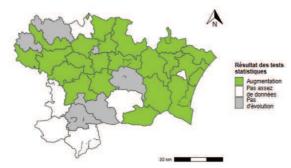
La figure 2.3 (A.) présente l'évolution du rapport C/N. Le rapport C/N nous donne une information sur l'activité biologique du sol, mais également sur les amendements organiques amenés au sol : un produit végétal a un rapport C/N plus élevé qu'un produit animal. Entre les deux périodes, on observe globalement une augmentation du rapport C/N, mais il est difficile d'établir un lien entre l'augmentation de ce rapport et l'augmentation du taux de MO. Deux hypothèses se présentent à nous : l'augmentation du taux de MO est associée à une diminution de l'activité biologique du sol, donc le turnover de la MO dans le sol est réduit ; ou alors l'augmentation du taux de MO est liée à des amendements organiques de matière végétale (paille, compost, broyats de déchets verts) plus fréquents. Il n'est pas possible de rejeter l'une ou l'autre de ces hypothèses sans des analyses plus poussées, mais cela nous montre qu'il n'est pas pertinent de simplement analyser la teneur en MO sans d'autres indicateurs sur son comportement et sa qualité.



La figure 2.3 (B.) présente la médiane cantonale du coefficient de minéralisation, qui est une estimation de la proportion de matière organique minéralisée annuellement. Ce coefficient est globalement assez

élevé sur l'ensemble du département et sera probablement en augmentation avec les hausses de températures attendues avec le changement climatique. Les valeurs du k2 sont cohérentes avec le contexte méditerranéen propice à la minéralisation de la matière organique. Cependant, il faut noter que le k2 est calculé à partir de la teneur en calcaire total, qui est un indicateur assez peu choisi par les agriculteurs dans les menus d'analyses : on n'a pu calculer le k2 seulement sur 20% des analyses de la base.

Approfondissement du traitement statistique



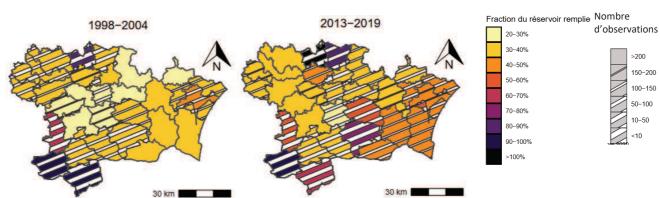
<u>Figure 2.4</u>: Test d'évolution des valeurs de la MO entre 1998-2004 et 2013-2019

<u>Source</u>: BD sols CA 11, basé sur la méthode de Saby et al., 2017. Réalisation Lucille Caradec

La figure 2.4 présente les résultats des tests statistiques décrits précédemment. Ces résultats du test sont corrélés avec l'évolution que nous avions observée sur la figure 2.2. Ces tests statistiques sont intéressants pour mitiger les biais présents de la base et pour augmenter la significativité de la détection de grandes tendances. Le développement de telles méthodes permet de mener des études à grande échelle sur des propriétés globales des sols pour un coût très réduit (Arrouays et al. 2012).

Potentiel de stockage de matière organique

La figure 2.5 présente l'évolution du remplissage du taux de saturation en carbone selon la formule de Hassink présentée précédemment. On voit que le remplissage du potentiel a une légère tendance à l'augmentation, mais qu'il reste faible (autour de 30-40% sur tout le département). Cette carte présente une autre dimension de l'état actuel des sols, et met surtout en valeur un potentiel de stockage intéressant : en théorie, on pourrait potentiellement doubler la MO des sols dans la plupart des cantons. Cette analyse est notamment à rapprocher de l'initiative 4 pour mille, et il est possible que les agriculteurs reçoivent des aides financières s'ils effectuent des démarches pour augmenter de manière significative la MO de leurs sols.



<u>Figure 2.5 :</u> Evolution du remplissage du taux de saturation en carbone, médiane cantonale entre 1998-2004 et 2013-2019. Les rayures blanches présentent le nombre d'observations par canton ; plus elles sont épaisses moins il y a d'observations dans un canton donné à une période donnée.

<u>Source</u> : BD sols CA 11, à partir de la formule de Hassink, 1997. Réalisation Lucille Caradec

Cependant, on retrouve dans la bibliographie de nombreuses formules pour le potentiel de stockage, et il est difficile de trancher sur laquelle utiliser :

$$C_{sat} = 21.1 + 0.375 \times particules \ fines \ (Hassink, Whitmore 1997)$$

$$C_{sat} = 6.9 + 0.29 \times particules \ fines \ (Hassink, Whitmore, Kubat 1997)$$

$$C_{sat} = 4.09 + 0.37 \times particules \ fines \ (Hassink 1997)$$

Nous avons choisi la troisième formule sur les conseils de N. Saby, mais le nombre de formules existantes (et provenant de la même personne) est déconcertant. De plus, cette notion de taux de saturation en carbone ne fait pas consensus dans la communauté scientifique, et est à considérer avec une certaine distance.

III. Réalisation d'outils à destination des conseillers

1. Objectifs

Le travail effectué sur la base de données sol a été effectué très majoritairement sous R (R Core Team 2020), qui a permis de faire une analyse approfondie et précise de la base de donnée. Cependant, les conseillers de la Chambre d'Agriculture ne maitrisent pas ce langage. Nous avons donc décidé de développer un outil pour rendre ce travail accessible aux conseillers. Notre choix s'est porté sur le développement de Shinyapps (Chang et al. 2020) en raison de leur facilité d'utilisation et d'accès pour les utilisateurs, même novices en informatique. Deux usages principaux ont été identifiés : permettre à l'utilisateur de produire des cartes à partir de la base de données et offrir un cadre de référence pour l'interprétation des analyses de sol.

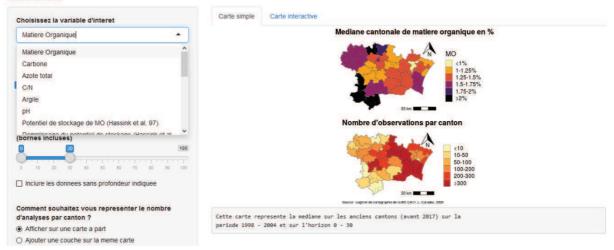
Le développement des outils a été encouragé par Nicolas Saby de l'INRAé Orléans, qui souhaitait que le travail initié pendant mon stage ne soit pas perdu. La programmation de ces outils a été pour moi une réelle montée en compétences, avec l'apprentissage de la programmation sous Shiny et la construction d'applications réactives. De plus, ces outils permettent une réelle montée en compétence des agents de la Chambre, qui peuvent désormais s'approprier la base de données du laboratoire de sols.

2. Outil de cartographie

L'outil de cartographie se décline en deux versions : avec un découpage communal et avec un découpage cantonal. La figure 3.1 présente une capture d'écran de cet outil. L'utilisateur peut choisir la variable à représenter (toutes les variables mesurées par les analyses du laboratoire sont représentées), la période d'étude, la profondeur d'échantillonnage et les préférences d'affichage. Le logiciel va ensuite calculer la médiane cantonale (ou communale) de la variable sur la période et la profondeur sélectionnée par l'utilisateur, puis va produire une carte téléchargeable par l'utilisateur au format .png.

L'utilisateur a également accès à une carte interactive, développée grâce au package plotly (Sievert 2020), qui permet à l'utilisateur de voir la valeur précise de la médiane et du nombre d'observations par canton (commune) en survolant avec la souris. L'utilisateur peut également modifier l'emprise de la carte en modifiant le fichier shapefile des cantons (communes).

Cartographie de la BD du laboratoire sols de la Chambre d'Agriculture de l'Aude. Decoupage cantonal.



<u>Figure 3.1 :</u> Capture d'écran du logiciel de cartographie <u>Source :</u> logiciel de cartographie de la BD CA 11, L. Caradec.

3. Outil d'interprétation des analyses de sol

L'outil d'interprétation des analyses de sol permet à l'utilisateur de rentrer son analyse de sol et de comparer les indicateurs principaux de l'analyse de sol aux autres analyses de la base, sélectionnées sur des critères choisis par l'utilisateur. L'utilisateur peut choisir de comparer son sol aux autres sols

- de même texture (selon la classification GEPPA (*Synthèse des travaux de la commission de cartographie* 1981))
- de même culture (selon le recensement général agricole (Agreste 2010), méthodologie décrite précédemment)
- de même pH : le pH est catégorisé sur une échelle avec un pas de 0.5
- de même canton
- sur une période au choix

Le logiciel présente ensuite une analyse du sol divisée en 4 catégories :

- Onglet « Texture » : La texture du sol présentée sur un triangle des textures
- Onglet « Carbone » : La répartition de la MO et du rapport C/N des sols de la base, comparée à la MO et au rapport du sol
- Onglet « Elements minéraux » : la répartition de la CEC et du rapport CEC/Argile et CEC/Carbone
- Onglet « Fertilisation » : la répartition des cations principaux : azote, phosphate, potasse et magnésium.

Ce logiciel permet de s'affranchir des référentiels agronomiques pour interpréter une analyse de sols. En effet, ces référentiels agronomiques sont assez peu adaptés à des zones méditerranéennes et à des cultures comme la vigne. De plus, ces référentiels ne prennent jamais en compte la texture du sol, qui est pourtant un des déterminants les plus importants du comportement du sol.

Un autre intérêt de ce logiciel est qu'il fait une analyse non paramétrique sur le comportement des indicateurs dans le sol. Si par exemple la MO était répartie de manière bimodale, une analyse sur la base de la moyenne effacerait complètement la variabilité réelle de la MO. Cette approche non paramétrique rend le logiciel adaptable et pertinent quelle que soit l'analyse de sol.



<u>Figure 3.2 :</u> Capture d'écran du logiciel d'interprétation d'analyse de sols <u>Source :</u> Logiciel d'analyse de sols de la BD CA11, L. Caradec

4. Perspectives

Les logiciels seront sous la responsabilité de Gilles Boyer, expert en agro-pédologie et responsable du laboratoire d'analyses. Il sera responsable de maintenir les logiciels en bon état, notamment de réactualiser la base de données régulièrement. Ce rôle de maintenance sera crucial pour assurer un bon fonctionnement à long terme.

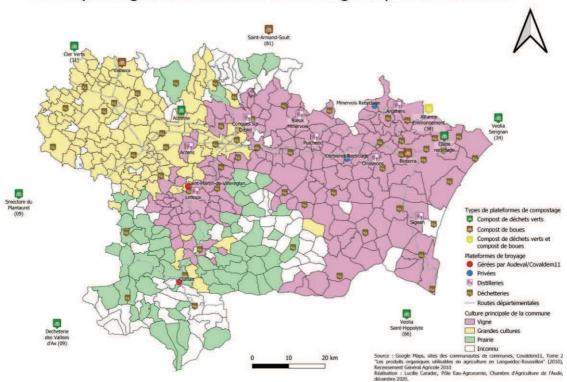
L'accès aux logiciels ne sera pas accordé à tous les salariés de la Chambre, en effet les données qu'utilisent les logiciels ne peuvent pas être laissées en accès libre. Des enjeux politiques tels que la définition des zones vulnérables dépendent de ces cartes, et M. Boyer doit garder un contrôle sur la manière dont peuvent être interprétées les cartes issues du logiciel de cartographie.

IV. Ebauche d'un plan d'action départemental de redressement de la matière organique des sols

1. Enquête de terrain sur les gisements de matière organique du département

L'objectif est d'élaborer une stratégie départementale de redressement de la MO des sols agricoles, à partir d'amendements organiques locaux et adaptés aux problématiques des différents sols. Nous avons commencé par recenser les sources de matière organique sur le département et sur les départements adjacents (Haute Garonne, Tarn, Pyrénées Orientales, Hérault, Ariège). Nous nous sommes intéressés à quatre sources de matière organique : les composts de déchets verts, les composts de boues et de déchets verts, les marcs de distillerie (composté ou non) et le déchet vert brut (broyat et déchetteries). Le recensement des différents gisements des matières organiques a été fait par une recherche sur les sites des différentes communautés de communes, une recherche sur Google Maps et une enquête auprès des conseillers de la Chambre. Le résultat de cette enquête est présenté sur la figure 4.1. Les cartes ont été réalisées sous QGIS 3.14 (QGIS Development Team 2020).

Principaux gisements de matière organique dans l'Aude



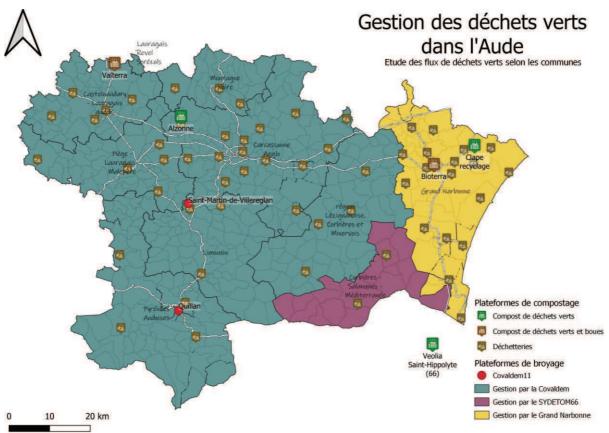
<u>Figure 4.1</u> : Principaux gisements de matière organique dans l'Aude : distilleries et plateformes de broyage et de compostage

<u>Source</u> : réalisation Lucille Caradec

Gestion des déchets par les collectivités publiques

La figure 4.2 présente la gestion des déchets verts par les collectivités territoriales. Dans l'Aude, elle s'organise autour de trois acteurs : la Covaldem11 (en bleu), la communauté de communes du Grand Narbonne (en jaune) et le SYDETOM66 (en violet). La Covaldem11 est un syndicat mixte de gestion des déchets qui couvre une grande partie du territoire. Le traitement des déchets est géré par une convention de délégation de service public avec Suez. Les déchets verts sont transférés depuis les déchetteries, transitent par les plateformes de transfert et de broyage selon leur localisation et sont compostés sur la plateforme d'Alzonne (qui est exploitée par Suez). En fin de compostage, les refus de

criblage sont acheminés sur la plateforme de compostage de Valterra (exploitant indépendant) en tant que structurant pour le compost de boues. Le Grand Narbonne fait appel à deux sociétés privées pour la gestion des déchets verts : La Clape Recyclage et Bioterra. Chacune est dimensionnée pour recevoir la moitié des déchets verts de la communauté de communes. Enfin, la communauté de communes Corbières-Salanques-Méditerranée est associée au SYDETOM66, le syndicat de gestion des déchets des Pyrénées Orientales. Les déchets verts sont compostés sur la plateforme de Saint-Hippolyte, exploitée par Véolia.



<u>Figure 4.2</u> : Gestion des déchets verts dans l'Aude <u>Source</u> : réalisation Lucille Caradec

Nous avons rencontré les représentants de la Covaldem11 et de la gestion des déchets au Grand Narbonne pour obtenir certaines de ces informations et pour discuter de partenariats possibles. Pour la Covaldem11, la taille du territoire est telle qu'ils ont intérêt à opter pour une gestion locale des déchets verts pour certaines déchetteries ou pour les plateformes de broyage et de transfert. Cependant, la délégation de service public qui lie la Covaldem11 à Suez sera probablement un frein puisque la Covaldem11 s'engage à livrer une certaine quantité de déchets verts. Le directeur Service Environnement au Grand Narbonne était bien plus enthousiaste pour un tel projet et serait prêt à mettre en place des projets de compostage à la ferme pour décharger quasi-entièrement les plateformes de broyage de Sigean et Ginestas.

Autres sources de déchets verts

Les autres sources de déchets verts que nous avons identifiées sont les entreprises privées de gestion des déchets du BTP et les paysagistes. Pour les entreprises de déchets du BTP, elles nous ont confirmé proposer des prestations de traitement des déchets verts mais ce n'est qu'une part marginale de leur activité. Pour les paysagistes, certaines entreprises réalisant des prestations générant beaucoup de

déchets verts (tonte des espaces publics, élagage) pourraient trouver un intérêt à s'engager dans des démarches de valorisation locale de leurs déchets verts. En effet, elles éviteraient ainsi de payer la redevance ordures ménagères qui peut être très élevée.

Marcs de distillerie

L'Aude est un département avec une forte production de vin. Les moûts issus de la fermentation du vin sont ensuite revendus aux distilleries, qui en font de l'alcool pur. La production de cet alcool génère des marcs, que les distilleries cherchent à valoriser. Traditionnellement ces marcs sont utilisés en tant qu'amendements dans les vignes, mais ils ont développé une mauvaise image auprès des agriculteurs, notamment pour leur teneur en métaux lourds (cuivre) élevée. Les marcs ont également un temps de résidence très longs dans les sols, avec un ISB (Indice de Stabilité Biologique) généralement supérieur à 85%. Les distilleries cherchent donc à développer des solutions de transformation pour leurs marcs, afin d'améliorer leur qualité en tant qu'amendement organique.

On peut ainsi citer la distillerie de La Cavale à Limoux, qui produit du compost de marc en association avec des déchets verts. Leur plateforme de compostage est actuellement située dans les Midi-Pyrénées, et un projet de compostage dans l'Aude est actuellement en étude (Fournial 2015). De même, la distillerie Sud Languedoc à Sigean et Ornaisons a un projet de méthanisation et de compostage des marcs (Sigean. Sud Languedoc et l'Inra inventent l'économie circulaire 2014). Ces acteurs se sont montrés assez intéressés par notre projet, même s'il faut reconnaître que leur engagement dans cette démarche est bien antérieur au nôtre. Cependant, la Chambre d'Agriculture pourrait être un acteur intéressant pour structurer des projets engageant plusieurs acteurs (agriculteurs, producteurs de matières organiques et prestataires de travaux agricoles).

2. Caractérisation agronomique des différents amendements organiques

Indicateurs agronomiques

Les indicateurs agronomiques les plus souvent utilisés pour évaluer la qualité d'un amendement organique sont l'Indice de Stabilité Biologique (ISB), l'Indice de Stabilité de la Matière Organique (ISMO), le rapport C/N, la teneur en MO et la teneur en Matière Sèche (MS). Un autre paramètre important pour la prise de décision est le prix à la tonne de produit épandu et le prix par kg de matière organique, que nous allons développer dans la suite de l'étude.

ISB et ISMO : différence, pertinence et méthode de calcul

Les différents modèles de dynamiques des MO du sol à long termes, tels que le modèle de Hénin Dupuis, supposent du connaître le coefficient isohumique k1 de l'amendement organique. Or la détermination de ce coefficient nécessite des tests au champ longs et coûteux, et les valeurs de référence manquent pour les nouvelles matières organiques (Chambre d'Agriculture Languedoc Roussillon et al. 2011). Les premières recherches pour un nouvel indicateur ont abouti à la mise au point de l'ISB (Linères, Djakovitch 1993), qui consiste à identifier les différentes fractions biochimiques du produit (fraction soluble, hémicellulose, cellulose et lignine) et à quantifier leur résistance à la dégradation biochimique.

L'ISB a ensuite été abandonné au profit de l'ISMO, qui est un indicateur composite calculé avec un fractionnement biochimique comme l'ISB et avec une mesure du carbone minéralisé à 91 jours. L'ISMO est donc plus juste pour estimer les dynamiques des MO dans le sol à court et moyen terme, avec un protocole expérimental moins lourd que le coefficient isohumique.

Comment interpréter l'ISMO et le C/N

L'ISMO est donné en % de matière organique, il indique la fraction du produit qui deviendra des composés humiques stables après dégradation dans le sol. On va notamment utiliser l'ISMO pour faire des calculs de quantité de MO à apporter à la parcelle dans des plans de redressement (voir figure 4.3)

Taux de MO de mon sol	9,63	g/kg
Densité (calculée à partir de la texture)	1,5	g/cm3
Masse de terre sur une profondeur de 30 cm	4500	t/ha
Stock de MO sur l'horizon 0-30	43,335	t/ha
Taux de MO souhaité	14	g/kg
Stock de MO voulu	63	t/ha
Humus à apporter à la parcelle	19,665	t/ha

Taux MS (donnée fabriquant)	62%	
Taux de MO (donnée fabriquant)	340	kg/t de produit sec
1 t de compost brut apporte	210,8	kg de MO totale
ISMO (donnée fabriquant)	800	kg/t de MO
1 t de compost brut apporte	168,6	kg d'humus
Pour redresser ma parcelle, il me faut	19,67	t/ha
Donc il faut amener	117	t/ha de compost brut

<u>Figure 4.3</u> : Calcul de redressement de la teneur en matière organique à l'échelle d'une parcelle <u>Source</u> : Cas d'étude sur une analyse de la base de données du laboratoire d'analyse de sols. Réalisation Lucille Caradec

Le C/N donne une indication sur le comportement de la matière organique dans le sol. Plus il est élevé, plus la faune va avoir tendance à consommer les réserves en azote minéral du sol pour digérer l'amendement. Il faut donc chercher un rapport C/N cohérent avec les besoins du sol : pour une parcelle en interculture riche en nitrates, il peut être intéressant d'amender avec un compost riche en carbone pour mobiliser l'azote du sol et éviter la lixiviation. A l'inverse, il faudra éviter les produits trop riches en carbone si le sol est déjà sensible aux faims d'azote.

Composts

Le processus de compostage consiste en une digestion anaérobie des composés organiques (Chambre d'Agriculture Occitanie et al. 2019). Il comporte une phase thermophile (avec plusieurs couples temps-température décrits dans la réglementation) qui permet d'arriver à un produit final homogène, facilement épandable et sain (absence de pathogènes et de graines d'adventices). Les caractéristiques agronomiques des composts dépendent beaucoup d'un produit à l'autre, en fonction des matières premières, des étapes de compostage et du temps de maturation en fin de compostage.

Le compost peut être normé selon deux normes : la norme NF U44-051 et la norme NF U44-095. La norme NF U44-051 désigne les composts de déchets verts et de quelques biodéchets (déchets de cuisine et de table, refus des IAA). Ce compost est utilisable en agriculture biologique. On distingue généralement ces composts entre les composts « jeunes » et « matures ». Un compost jeune va avoir tendance à dynamiser la vie du sol, avec un risque de créer une faim d'azote. Un compost plus mature va avoir tendance à créer plus de composés humiques et à augmenter la structure du sol à long terme (Chambre d'Agriculture Provence-Alpes-Côte d'Azur, Bio de Provence Alpes-Côte d'Azur, Orgaterre 2013).

La norme NF U44-095 désigne les composts de boues de station d'épuration et de déchets verts. Ces composts ont une teneur en éléments trace métalliques (ETM) plus élevée et sont riches en phosphates. Les composts de boues ont généralement une mauvaise image auprès des agriculteurs, malgré les nombreux contrôles tout au long du processus de production et l'intérêt agronomique d'utiliser de tels amendements. Dans un contexte où la ressource en roches phosphatées devient une source de tensions majeure, le recours à ces amendements riches en phosphates est d'autant plus pertinent (Alewell et al. 2020). Cependant, en raison de leur image auprès des agriculteurs et des

nombreuses contraintes autour de ces composts de boues (interdiction en agriculture biologique et en maraichage), nous allons prioriser d'autres sources de matière organique.

Déchets verts bruts

Les broyats de déchets verts et le Bois Raméal Fragmenté peuvent être utilisés en incorporation ou en paillage. Ils ont un potentiel humigène relativement faible et un C/N variable en fonction des matières premières. Plus la produit d'origine est ligneux et avec un diamètre élevé, plus le C/N sera haut et plus le risque de faim d'azote sera grand. Il faut également être vigilant aux espèces qui sont broyées : les thuyas, lauriers et résineux sont à éviter. Comme nous l'avons vu dans notre étude de l'évolution de la matière organique, le C/N est globalement en augmentation dans les sols : nous aurons de préférence recours à des amendements plus matures, avec un C/N moins élevé.

Marcs de distillerie

La mauvaise image dont jouissent les marcs, évoquée précédemment, est en partie vérifie par l'analyse agronomique des produits. Les marcs ont généralement des teneurs en cuivre très élevée, ce qui les empêche même d'être épandus sur certaines parcelles. Ils ont également un ISMO très élevé, au point qu'on peut retrouver des marcs intacts dans les sols plusieurs années après l'épandage, et qu'on peut se demander dans quelle mesure les marcs sont digérés par la vie du sol. La qualité agronomique des marcs compostés ou méthanisés est meilleure que celle des marcs bruts, mais nous manquons à ce stade de données sur les effets observables dans les sols.

3. Choix de secteurs sur lesquels mener l'action sols

Une enquête a été menée autour de plusieurs acteurs :

- Des représentants de la gestion collective des déchets dans l'Aude : M. Philippe Marcel pour la Covaldem11 et M. Patrice Rambaud pour l'agglomération du Grand Narbonne
- Des entreprises de gestion et traitement de déchets : La Clape Recyclage, Corbières Recyclage, Minervois Recyclage, Valterra
- Des prestataires de matériel agricole : Italagri, M. Frédéric Couturier, Elagage du Sud, M. Remy Cathala
- Des conseillers et des techniciens de la Chambre d'Agriculture basés dans les quatre grands territoires de développement : Ouest Audois, Haute Vallée de l'Aude et Limouxin, Est Audois et Corbières-Minervois.
- Des élus à différentes instances : Chambre d'Agriculture, Communautés de communes, groupes de développement agricole

Le but de cette enquête est de définir deux à trois secteurs sur lesquels lancer l'action sols, en tenant compte dans chaque secteur de l'occupation du sol, du taux de MO moyen et des problématiques actuelles et futures liées au changement climatique.

Nous nous intéressons particulièrement aux possibilités de développer des plateformes de compostage de déchets verts chez les agriculteurs : ces projets contribuent à l'économie circulaire, permettent une réduction des émissions de gaz à effets de serre et offrent une solution à bas coût pour les agriculteurs et pour les collectivités. Dans ce genre de projets, la Chambre se placerait comme un coordinateur des différents acteurs : rédaction d'une charte de compostage, traçabilité du compost et expertise agronomique sur la qualité des amendements. Dans un tel projet, le déchet vert serait amené broyé à la parcelle, puis retourné deux ou trois fois sur une période de six mois et broyé plus

finement en fin de compostage. Il serait ensuite laissé sur place pour maturer pendant six mois de plus, puis serait amené sur des parcelles voisines (moins de 4 km) pour être épandu.

Grand Narbonne

L'agglomération du Grand Narbonne couvre un territoire allant du Fitou à l'embouchure de l'Aude, en passant par les Corbières. Ce secteur est particulièrement sensible au stress hydrique et a des taux de MO assez disparates selon les communes.

L'agglomération du Grand Narbonne nous apparaît comme un partenaire de choix : ils ont tout de suite été convaincus par notre projet, tant pour les intérêts agronomiques que pour l'aspect d'économie circulaire. Ils nous mettent à disposition un gisement de plus de 5000t/an de déchets verts pour mettre en place des plateformes de compostage à la ferme. Nous avons déjà identifié des prestataires pour le broyage et le retournement des andains. Un point critique sera l'épandage : d'une part, c'est une pratique longue et couteuse en vigne, d'autre part il est assez difficile de trouver des prestataires possédant des épandeurs à compost en vigne.

Lauragais Audois et Piège

Le Lauragais audois et la Piège sont des secteurs où les grandes cultures dominent. Le relief en coteaux plus ou moins vallonnés rend les sols extrêmement sensibles à l'érosion physique, plus particulièrement au moment des orages de printemps. Lorsque les sols sont nus (notamment à cause de la période de plantation de maïs), ces orages peuvent arracher jusqu'à 10 cm de sol à la surface et provoquer des coulées de boue.

Une rencontre avec la Communauté de Communes de Castelnaudary-Lauragais-Audois en février devrait nous permettre de préciser les solutions possibles en termes d'utilisation des gisements de déchets verts. Nous avons contacté M. Frédéric Couturier, un prestataire qui peut prendre en charge le broyage et le retournement des andains, et qui dispose d'un épandeur grandes cultures. Par contre, quasiment tout le territoire est en zone vulnérable nitrates, ce qui risque de nous contraindre sur les durées de stockage du compost sur les parcelles.

Carcassès

Le Carcassès est un autre secteur particulièrement exposé au stress hydrique et avec des taux de MO très bas dans les sols. Un autre intérêt de ce secteur est que les exploitations agricoles ont une orientation mixte entre les grandes cultures et la vigne.

La Covaldem11 exploite une plateforme de broyage et de transfert des déchets verts à Saint-Martinde-Villereglan, et prend en charge le transport des déchets verts broyés dans un rayon de 20 km autour de la plateforme. M. Frédéric Couturier pourrait également prendre en charge les opérations de manutention du compost.

4. Perspectives

Plusieurs conseillers nous ont déjà donné leur accord pour mobiliser leurs réseaux d'agriculteurs et donner des formations sur la matière organique, la vie du sol et les amendements organiques. Durant ces formations, nous pourrions également présenter notre projet de compostage à la ferme, avec une étude économique fine. Nous avons également identifié quelques agriculteurs déjà engagés dans des projets de compostage à la ferme, il serait par exemple envisageable de faire des journées de sensibilisation chez eux.

L'automne est la période idéale pour commencer un compost, car la pluviométrie remplace en grande partie l'arrosage dont a besoin le compost. Dans l'idéal, les premières opérations de compostage débuteront en automne 2021, pour épandre un compost mature en automne 2022.

L'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse finance dix analyses biologiques de sols, qui devraient nous permettre de comprendre plus finement l'intérêt d'amendements organiques selon les problématiques du sol. Dans chaque secteur, il nous faudra choisir une parcelle représentative des enjeux agronomiques locaux et réaliser deux analyses de sol, avant et après amendement organique.

Conclusion

La mise en place de projets territoriaux avec une logique de proximité nécessite une connaissance approfondie du territoire, de ses ressources et de ses enjeux. Pour la Chambre d'Agriculture de l'Aude, l'ébauche d'une stratégie collective de redressement des taux de matière organique des sols à partir d'amendements organiques locaux n'aurait pas été possible sans un travail cartographique approfondi en amont.

Dans un premier temps, l'analyse de la base de données du laboratoire d'analyse de sol de la Chambre d'Agriculture de l'Aude nous a permis de mettre en évidence une augmentation des taux de matière organique sur les sols du département sur les vingt dernières années. Cette augmentation des taux de matière organique était une surprise pour certains conseillers et témoigne de l'impact des changements de pratiques agricoles. De plus, l'analyse de la base de données montre un potentiel de stockage en carbone organique des sols encore peu exploité, ce qui nous pousse à continuer nos efforts pour redresser les taux de matière organique.

Ensuite, le travail de développement d'outils permet de revaloriser les informations contenues dans la base de données du laboratoire d'analyse de sols. En effet, notre travail de cartographie du territoire nous a montré l'intérêt de cette base de données en tant qu'outil de représentation du territoire à moindre coût. On peut par exemple imaginer intégrer des cartes du département dans des études ou rapports faisant un état des lieux des enjeux territoriaux.

Enfin, l'étude des gisements de matière organique et de l'organisation des structures de gestion collective de déchet verts nous a permis d'identifier les acteurs clés pour mettre en place une stratégie départementale de redressements des taux de matière organique des sols. Cependant, cette analyse a également mis en évidence la difficulté de trouver des amendements organiques dans un département où l'élevage a fortement régressé depuis le remembrement, au point où les élevages sont désormais majoritairement extensifs et confinés aux zones « défavorisées ». Ce type d'élevage ne produisant que très peu d'effluents, cela pose la question de la pertinence de la sur-spécialisation des territoires. En effet, au-delà de l'importance des effluents d'origine animale pour amender les sols, on peut également penser aux services écosystémiques rendus par les prairies permanentes dans des zones fortement soumises à l'érosion comme le Lauragais.

Tout au long de la mise en place de notre stratégie de redressement des sols audois, il faudra garder à l'esprit qu'une amélioration de la qualité des sols dépend avant tout des pratiques agricoles : la meilleure matière organique, c'est celle qui reste dans le sol. Il faut donc encourager la couverture maximale du sol et le retour des résidus de culture au sol. Cependant, cela pose également la question de l'agriculture de conservation, qui est critiquée par certains pour son recours à des herbicides dans des techniques de semis sous couvert et encensée, par d'autres, pour son impact sur la qualité des sols.

Toutes ces questions mettent en évidence la complexité des changements de pratiques agricoles, qui doivent répondre à des nombreux objectifs parfois contradictoires. Face à ces défis, le rôle des Chambres d'Agricultures n'est pas de trancher sur les avantages et inconvénients des différentes pratiques, mais plutôt d'orienter les agriculteurs vers des systèmes de production durables économiquement et écologiquement et compatibles avec les évolutions réglementaires, les attentes sociétales et les contraintes climatiques.

Bibliographie

20 : Synthèse des travaux de la commission de cartographie, 1981. . GEPPA (Groupe d'étude des problèmes de pédologie appliquée).

AGRESTE, 2010. Recensement Agricole 2010 [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://agreste.agriculture.gouv.fr/

ALEWELL, Christine, RINGEVAL, Bruno, BALLABIO, Cristiano, ROBINSON, David A., PANAGOS, Panos et BORRELLI, Pasquale, 2020. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nature Communications*. 11 septembre 2020. Vol. 11, n° 1, pp. 1-12. DOI 10.1038/s41467-020-18326-7.

ARROUAYS, D., MARCHANT, B. P., SABY, N. P. A., MEERSMANS, J., ORTON, T. G., MARTIN, M. P., BELLAMY, P. H., LARK, R. M. et KIBBLEWHITE, M., 2012. Generic Issues on Broad-Scale Soil Monitoring Schemes: A Review. *Pedosphere*. 1 août 2012. Vol. 22, n° 4, pp. 456-469. DOI 10.1016/S1002-0160(12)60031-9.

ARROUAYS, Dominique, JOLIVET, C., BOULONNE, L., BODINEAU, G., SABY, Nicolas et GROLLEAU, E., 2002. A new initiative in France: a mult-institutional soil quality monitoring network. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*. 2002. N° 88, pp. 93-105.

ARROUAYS, Dominique, SABY, Nicolas, WALTER, Christian, LEMERCIER, Blandine et SCHVARTZ, Christian, 2006. Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use and Management*. 1 mars 2006. Vol. 22, pp. 48-51. DOI 10.1111/j.1475-2743.2006.00020.x.

CHAMBRE D'AGRICULTURE LANGUEDOC ROUSSILLON, CHAMBRE D'AGRICULTURE AUDE, CHAMBRE D'AGRICULTURE HÉRAULT, CHAMBRE D'AGRICULTURE GARD, CHAMBRE D'AGRICULTURE LOZÈRE, et ASSOCIATION INTERPROFESSIONNELLE DES VINS BIOLOGIQUES DU LANGUEDOC ROUSSILLON, 2011. Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc Roussillon.

CHAMBRE D'AGRICULTURE OCCITANIE, CHAMBRE D'AGRICULTURE AUDE, CHAMBRE D'AGRICULTURE AVEYRON, CHAMBRE D'AGRICULTURE GARD, CHAMBRE D'AGRICULTURE HAUTE-GARONNE, CHAMBRE D'AGRICULTURE HÉRAULT, CHAMBRE D'AGRICULTURE LOT, CHAMBRE D'AGRICULTURE LOZÈRE, CHAMBRE D'AGRICULTURE PYRÉNÉES ORIENTALES, et CHAMBRE D'AGRICULTURE TARN, 2019. Guide du compostage à la ferme.

CHAMBRE D'AGRICULTURE PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR, BIO DE PROVENCE ALPES-CÔTE D'AZUR, et ORGATERRE, 2013. *Matières Organiques en Agriculture Biologique*. 2013.

CHANG, Winston, CHENG, Joe, ALLAIRE, J. J., XIE, Yihui, MCPHERSON, Jonathan, MARK OTTO, JACOB THORNTON, BOOTSTRAP CONTRIBUTORS, ALEXANDER FARKAS, SCOTT JEHL, STEFAN PETRE, ANDREW ROWLS, DAVE GANDY, BRIAN REAVIS, KRISTOPHER MICHAEL KOWAL, DENIS INESHIN, SAMI SAMHURI, JOHN FRASER, JOHN GRUBER, IVAN SAGALAEV, et R. CORE TEAM, 2020. *shiny: Web Application Framework for R* [en ligne]. [Consulté le 8 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://CRAN.R-project.org/package=shiny

CHEN, Songchao, MARTIN, Manuel P., SABY, Nicolas P. A., WALTER, Christian, ANGERS, Denis A. et ARROUAYS, Dominique, 2018. Fine resolution map of top- and subsoil carbon sequestration potential in France. *Science of The Total Environment*. 15 juillet 2018. Vol. 630, pp. 389-400. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.02.209.

FOURNIAL, Thomas, 2015. Présentation du process de compostage du marc de raisin jusqu'au Onze300. . 2015.

GIRARD, Michel-Claude, WALTER, Christian, RÉMY, Jean-Claude, BERTHELIN, Jacques et MOREL, Jean-Louis, 2011. Sols et environnement - 2e édition - Cours, exercices et études de cas - Livre+compléments en ligne: Cours, exercices corrigés et études de cas. Dunod. ISBN 978-2-10-055891-9. Google-Books-ID: 2NI2C6Kr0NcC

GIS SOL, 2011. Synthèse sur l'état des sols de France. Groupement d'Intérêt Scientifique sur les sols.

GIS SOL, 2020. Réseau de Mesures de la Qualité des Sols – RMQS. [en ligne]. 2020. [Consulté le 7 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34

HASSINK, Jan, WHITMORE, Andrew P et KUBAT, Jaromir, 1997. Size and density fractionation of soil organic matter and the physical capacity of soils to protect organic matter. *European Journal of Agronomy*. 1997. pp. 11.

HASSINK, Jan et WHITMORE, Andrew P., 1997. A Model of the Physical Protection of Organic Matter in Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1997. Vol. 61, n° 1, pp. 131-139. DOI https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010020x.

HASSINK, Jan, 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. . 1997. N° 191, pp. 77-87.

J.P. BARTHÈS, M. BORNAND, et P. FALIPOU, 1999. *Référentiel Pédologique de la France - Pédopaysages de l'Aude. Echelle au 1/250000ème*. INRA-ENSA. Science du Sol Montpellier.

LAROCHE, Bertand et SCHNEBELEN, Nathalie, 2011. Le programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols(IGCS). [en ligne]. Journée d'Information. Charleville-Mezières. novembre 2011. Disponible à l'adresse : hal-02805201

LEMERCIER, Blandine, GAUDIN, L., WALTER, Christian, AUROUSSEAU, Pierre, ARROUAYS, Dominique, SCHVARTZ, C., SABY, Nicolas, FOLLAIN, Stéphane et ABRASSART, J., 2008. Soil phosphorus monitoring at the regional level by means of a soil test database. *Soil Use And Management*. 1 juin 2008. Vol. 24, pp. 131-138. DOI 10.1111/j.1475-2743.2008.00146.x.

LINÈRES, Monique et DJAKOVITCH, J. L., 1993. Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. In : *4. Journees de l'Analyse de Terre* [en ligne]. GEMAS - COMIFER. 16 novembre 1993. [Consulté le 13 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://hal.inrae.fr/hal-02776986

LOPEZ, Mathieu, 2020. Adaptation de l'agriculture audoise au changement climatique. 15 mai 2020.

MCLEMAN, Robert A., DUPRE, Juliette, BERRANG FORD, Lea, FORD, James, GAJEWSKI, Konrad et MARCHILDON, Gregory, 2014. What we learned from the Dust Bowl: lessons in science, policy, and adaptation. *Population and Environment*. 2014. Vol. 35, n° 4, pp. 417-440. DOI 10.1007/s11111-013-0190-z.

QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2020. *QGIS 3.14 : Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project* [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://qgis.org/fr/site/

R CORE TEAM, 2020. *R: A Language and Environment for Statistical Computing* [en ligne]. Vienne, Autriche: R Foundation for Statistical Computing. Disponible à l'adresse: https://www.R-project.org/

SABY, Nicolas, SWIDERSKI, Chloé, LEMERCIER, Blandine, WALTER, Christian, LOUIS, Benjamin, EVEILLARD, P. et ARROUAYS, Dominique, 2017. Is pH increasing in the noncalcareous topsoils of France under agricultural management? A statistical framework to overcome the limitations of a soil test database. *Soil Use and Management*. 1 août 2017. Vol. 33. DOI 10.1111/sum.12369.

SIEVERT, Carson, 2020. *Interactive web-based data visualization with R, plotly, and shiny* [en ligne]. [Consulté le 8 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://plotly-r.com/

Sigean. Sud Languedoc et l'Inra inventent l'économie circulaire, 2014. *ladepeche.fr* [en ligne]. [Consulté le 11 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://www.ladepeche.fr/article/2014/12/06/2006050-sud-languedoc-et-l-inra-inventent-leconomie-circulaire.html

WALTER, Christian, BOUEDO, T. et AUROUSSEAU, Pierre, 1995. *Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995.* Rapport final de la convention d'étude entre le Consil Régional de Bretagne et l'Ecole Nationale Suérieure Agronomique de Rennes. Rennes : ENSAR.

WICKHAM, Hadley, AVERICK, Mara, BRYAN, Jennifer, CHANG, Winston, MCGOWAN, Lucy D'Agostino, FRANÇOIS, Romain, GROLEMUND, Garrett, HAYES, Alex, HENRY, Lionel, HESTER, Jim, KUHN, Max, PEDERSEN, Thomas Lin, MILLER, Evan, BACHE, Stephan Milton, MÜLLER, Kirill, OOMS, Jeroen, ROBINSON, David, SEIDEL, Dana Paige, SPINU, Vitalie, TAKAHASHI, Kohske, VAUGHAN, Davis, WILKE, Claus, WOO, Kara et YUTANI, Hiroaki, 2019. Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software*. 21 novembre 2019. Vol. 4, n° 43, pp. 1686. DOI 10.21105/joss.01686.

Autres packages R utilisés, non cités dans le texte

BIVAND, Roger, LEWIN-KOH, Nicholas, PEBESMA, Edzer, ARCHER, Eric, BADDELEY, Adrian, BEARMAN, Nick, BIBIKO, Hans-Jörg, BREY, Steven, CALLAHAN, Jonathan, CARRILLO, German, DRAY, Stéphane, FORREST, David, FRIENDLY, Michael, GIRAUDOUX, Patrick, GOLICHER, Duncan, RUBIO, Virgilio Gómez, HAUSMANN, Patrick, HUFTHAMMER, Karl Ove, JAGGER, Thomas, JOHNSON, Kent, LEWIS, Matthew, LUQUE, Sebastian, MACQUEEN, Don, NICCOLAI, Andrew, PEBESMA, Edzer, LAMIGUEIRO, Oscar Perpiñán, PLUNKETT, Ethan, RUBAK, Ege, SHORT, Tom, SNOW, Greg, STABLER, Ben, STOKELY, Murray et TURNER, Rolf, 2020. *maptools: Tools for Handling Spatial Objects* [en ligne]. [Consulté le 26 janvier 2021]. Disponible à l'adresse: https://CRAN.R-project.org/package=maptools

DECKMYN, Original S. code by Richard A. Becker and Allan R. Wilks R. version by Ray Brownrigg Enhancements by Thomas P. Minka and Alex, 2018. *maps: Draw Geographical Maps* [en ligne]. [Consulté le 26 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://CRAN.R-project.org/package=maps

DUNNINGTON, Dewey et THORNE, Brent, 2021. ggspatial: Spatial Data Framework for ggplot2 [en ligne]. [Consulté le 26 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://cran.r-project.org/package=ggspatial

GARNIER, Simon, ROSS, Noam, RUDIS, Bob, SCIAINI, Marco et SCHERER, Cédric, 2018. *viridis: Default Color Maps from « matplotlib »* [en ligne]. [Consulté le 26 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://CRAN.R-project.org/package=viridis

JULIEN MOEYS, 2018. *soiltexture : Functions for Soil Texture Plot, Classification and Transformation* [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://CRAN.R-project.org/package=soiltexture

KASSAMBARA, Alboukadel, 2020. ggpubr: « ggplot2 » Based Publication Ready Plots [en ligne]. [Consulté le 26 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr

MAGRITTR), Stefan Milton Bache (Original author and creator of, WICKHAM, Hadley, HENRY, Lionel et RSTUDIO, 2020. *magrittr: A Forward-Pipe Operator for R* [en ligne]. [Consulté le 26 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://CRAN.R-project.org/package=magrittr

MIKEFC, 2021. *ggpattern : geom with patterns* [en ligne]. R. [Consulté le 26 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://github.com/coolbutuseless/ggpattern

NEUWIRTH, Erich, 2014. *RColorBrewer: ColorBrewer Palettes* [en ligne]. [Consulté le 26 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://CRAN.R-project.org/package=RColorBrewer

PEBESMA, Edzer, 2018. Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*. 2018. Vol. 10, n° 1, pp. 439-446.

RIPLEY, Brian et OCT 2002), Michael Lapsley (1999 to, 2020. *RODBC: ODBC Database Access* [en ligne]. [Consulté le 26 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://CRAN.R-project.org/package=RODBC

An ODBC database interface.

WICKHAM, Hadley et GROLEMUND, Garrett, 2017. *R for Data Science. Visualize, transform, tidy and import data.* [en ligne]. O'Reilly. [Consulté le 26 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://r4ds.had.co.nz/

WILKE, Claus O., 2020. cowplot: Streamlined Plot Theme and Plot Annotations for « ggplot2 » [en ligne]. [Consulté le 26 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://CRAN.R-project.org/package=cowplot

WILKE, Claus O., 2021. *ggridges: Ridgeline Plots in « ggplot2 »* [en ligne]. [Consulté le 26 janvier 2021]. Disponible à l'adresse : https://CRAN.R-project.org/package=ggridges