

Mention "Agrosociétés, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt"

Parcours "Gestion des sols et services écosystémiques"

Liens entre pratiques agricoles et teneur en carbone organique des sols dans les systèmes en polyculture-élevage

Links between agricultural practices and soil organic carbon content in
mixed farming systems

Par : Morgan Curien

Stage effectué à l'Acta (Les Instituts techniques Agricoles, 149 rue de Bercy).

Du 12 février au 10 août 2018.

Sous la direction de Pierre DUPRAZ (INRA), Francesca DEGAN (ACTA) et Vincent Manneville (Idele)



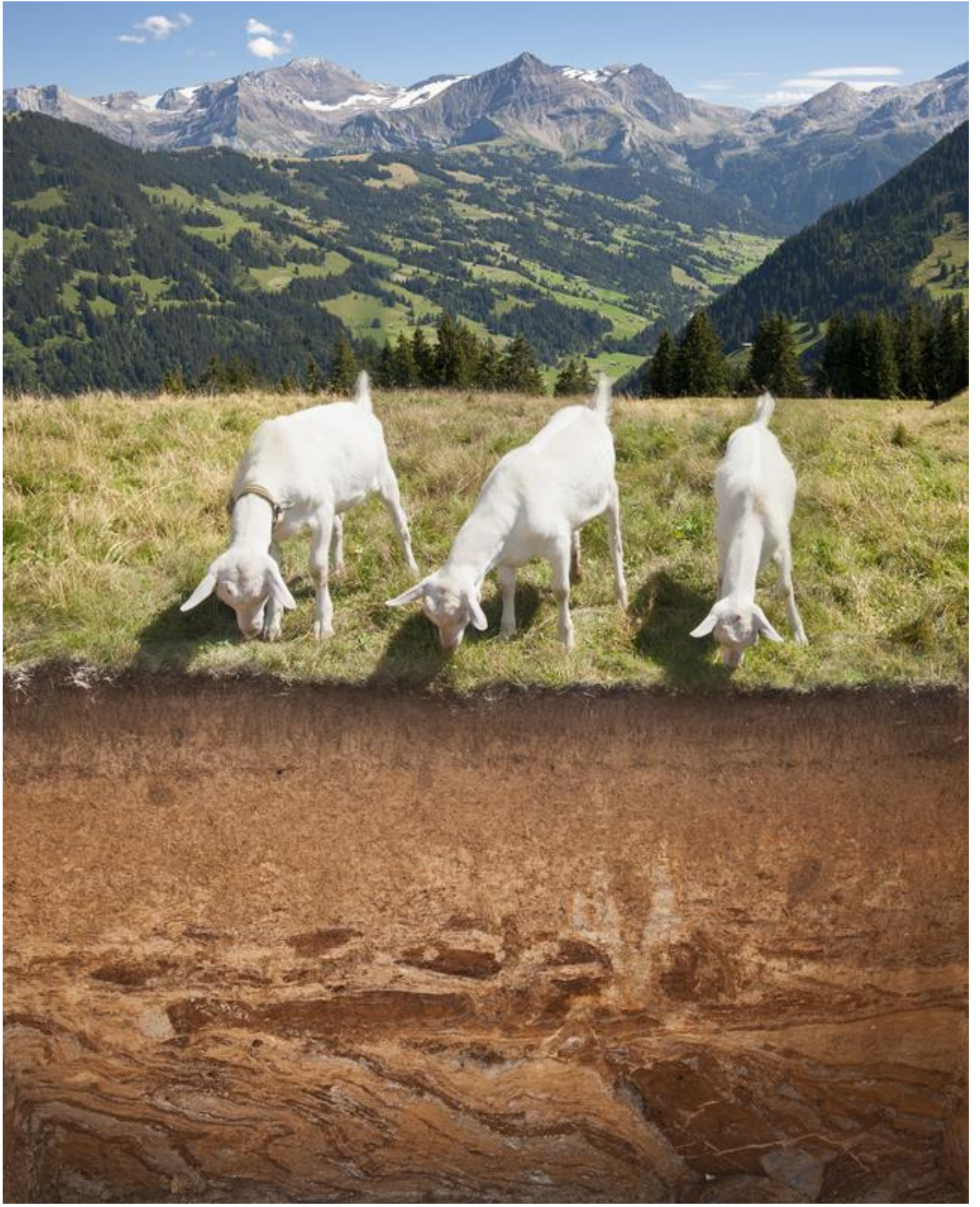
Soutenu le 05 septembre 2018, à Paris, devant le jury composé de :

Rapporteur : BAVEYE Philippe (AgroParistech)

Examineurs : BAVEYE Philippe (AgroParistech)

BENOIT Pierre (INRA) ou COQUET Yves (AgroParisTech)

MICHELIN Joël (AgroParisTech)



Remerciements

Je tiens à remercier tous mes encadrants : Francesca Degan pour ses conseils et son aide tout au long de mon stage, mon maître de stage Pierre Dupraz, qui malgré la distance a réussi à m'aiguiller et à m'a appris beaucoup de choses en statistiques, Vincent Manneville pour ses conseils et son apport sur le calcul des MOA, ainsi que Nicolas Saby et Pierre Mischler pour leurs conseils et connaissances. Je tiens aussi à remercier Alice Issanchou qui a pu m'apporter son soutien pour les traitements statistiques et la rédaction.

Je n'oublierai pas bien sûr l'équipe chargée de la communication de l'idèle avec qui j'ai passé mon stage, c'est une véritable famille d'accueil Caprine !

Un remerciement plus particulier et mes parents et ma compagne qui auront toujours su me soutenir lors de mes études. Je tiens à dédier ce rapport à mon beau père décédé lors de mon stage, il aurait j'en suis sûr été très fier du travail fourni et de la réussite de mes études.

Liste des sigles et abréviations

CO : Carbone Organique

COS : Carbone Organique des Sols

MO : Matières Organiques

MOA : Matière Organique Animale

MOS : Matière Organique des Sols

MOAh : Matière Organique Animale herbivore

MOAg : Matière Organique Animale granivore

SAMO : Surface Amendée en Matière Organique

SAU : Surface Agricole Utile

STU : Soil Typological Units

UGB : Unité Gros Bétail

UPC : Unités PédoClimatiques

Table des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Récapitulatif des variables impactant la teneur en carbone organique des sols..... | 12 |
| Tableau 2 : Variables utilisées pour le suivi de la teneur en carbone organique des sols (par canton). | 13 |
| Tableau 3 Les rotations simplifiées. | 20 |
| Tableau 4 Analyse de l'impact du pourcentage d'occupation sur la SAU de la vigne. Les variables surlignées en jaune ont été retenues après le calcul du plus petit AIC. Degrés de liberté : 1146, AIC = 5419, BIC = 5530,518, logLik = -2687,775. P.O. pour pourcentage d'occupation..... | 23 |
| Tableau 5 : Influence des zones climatiques sur la teneur en COS. Le type de climat de montagne n'y figure pas car nous n'avons pas de données d'analyse de COS. Degrés de liberté : 2365, AIC =1423,58 ; BIC = 14291,49 ; logLik = -7110,79 | 24 |
| Tableau 6 : Régression GLS de l'évolution de la teneur en COS en fonction des variables pédoclimatiques et agricoles. La première régression correspond à la régression réalisée sur tous les cantons, la deuxième utilise les mêmes variables mais est réalisée avec les cantons issus du prétraitement (seules les variables montrant des différences ont été présentées). Les variables fluorées sont celles retenues par la minimisation de l'AIC pour l'étude de la SAMO régionale. Les variables soulignées sont celles retenues par la minimisation de l'AIC pour l'étude de la MOA. Pour la régression avec tous les cantons : Degrés de liberté = 2365 ; AIC = 11371.59 ; BIC = 11550.41 ; LogLik = -5654.794. Pour la régression des cantons issus du prétraitement : Degrés de liberté = 1802 ; AIC 8155 ; BIC = 8326.19 ; LogLik = -4046.897. P.O. pour pourcentage d'occupation ; Evol.P.O. pour l'évolution du pourcentage d'occupation ; la MOA est en t de Matière Sèche/ha/an ; VIT pour la variabilité interannuelle de la température ; VIP pour la variabilité interannuelle de la pluie..... | 29 |
| Tableau 7 : Régression GLS de la teneur en COS de 2010 en fonction des variables pédoclimatiques et agricoles avec 78 cantons. Les régressions 1 et 2 sont composées des mêmes variables à l'exception des types de rotations simplifiées. Les variables fluorées sont celles retenues par la régression 1, et les variables soulignées sont celles retenues par la régression 2. Pour les deux régressions : degrés de liberté = 78; AIC = 304.1556 ; BIC = 358.36 ; LogLik = -129.0778. P.O. pour pourcentage d'occupation ; Evol.P.O. pour l'évolution du pourcentage d'occupation ; la MOA est en t de Matière Sèche/ha/an ; VIT pour la variabilité interannuelle de la température ; VIP pour la variabilité interannuelle de la pluie..... | 32 |
| Tableau 8: Régression GLS de l'évolution de la proportion de maïs fourrager. Degrés de liberté = 2365 ; AIC = 10727.19 ; BIC = 10848.33 ; LogLik = -5342.594 | 35 |
| Tableau 9 : Régression GLS de l'évolution du pourcentage d'occupation de la prairie temporaire. Degrés de liberté = 2365 ; AIC = 13333.19 ; BIC = 13477.4 ; LogLik = -6641.595. P.O. pour pourcentage d'occupation ; Evol.P.O. pour l'évolution du pourcentage d'occupation ; la MOA est en t de Matière Sèche/ha/an ; VIT pour la variabilité interannuelle de la température ; VIP pour la variabilité interannuelle de la pluie..... | 36 |
| Tableau 10 : Moyenne nationale de la teneur en carbone organique du sol en fonction des différents types d'occupation du sol (Saby et al., 2014) | 43 |

Tableau 11 : Régression GLS de l'évolution de la teneur en COS en fonction des variables pédoclimatiques et agricoles. La première régression correspond à la régression réalisée sur tous les cantons, la deuxième utilise les mêmes variables mais est réalisée avec les cantons issus du prétraitement (seules les variables montrant des différences ont été présentées)..... 43

Table des figures

Figure 1 La démarche d'analyse..... 13

Figure 2 : Diagrammes en camembert de la fréquence des cultures par rapport aux cultures simplifiées. Les répétitions d'une même culture au sein de la rotation ne sont pas comprises dans le calcul..... 31

Figure 3 : ACP du pourcentage des assolements auquel on a projeté les types de rotations. Réalisée avec les 78 cantons. L'ACP est réalisé avec 5 axes, le pourcentage explicatif est de l'ordre de 100%. P1_courte : pourcentage de rotation courte. P1_longue : pourcentage de rotation longue ; p1_longue.prairie : pourcentage de rotation longue avec prairie ; p1_prairie : pourcentage des prairies permanentes. Les variables en noir indiquent le pourcentage que prend chaque type d'assolement sur la SAU totale en 2000..... 33

Figure 4 : Boxplot des pourcentages d'erreur entre le pourcentage de prairie dans le RA et dans les calculs d'approximation des rotations (pE_regression avec l'approximation par les régressions et pE_ACP avec l'approximation par l'ACP)..... 37

Figure 5 : Boxplot des pourcentages d'erreur entre le pourcentage des rotations mesurées et approximées avec l'ACP des 78 cantons. E_ACP_rc pour l'erreur d'approximation des rotations courtes, rl pour rotation longues, rlp pour rotation longues avec prairie et p pour rotation uniquement prairiale. 38

Figure 6 : Boxplot des pourcentages d'erreur entre le pourcentage des rotations mesurées et approximées avec l'ACP des 78 cantons. E_ACP_rc pour l'erreur d'approximation des rotations courtes, rl pour rotation longues, rlp pour rotation longues avec prairie et p pour rotation uniquement prairiale. 38

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION..... | 8 |
| SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE | 10 |
| FACTEURS NATURELS | 10 |
| FACTEURS AGRONOMIQUES..... | 11 |
| MATERIELS ET METHODES | 12 |
| DEMARCHE | 12 |
| BASES DE DONNEES..... | 13 |
| CARBONE ORGANIQUE DES TERRES AGRICOLES..... | 14 |
| APPORTS DE MATIERE ORGANIQUE ANIMALE (MOA)..... | 15 |
| OCCUPATION DU SOL ET ROTATIONS..... | 17 |
| <i>Zones d'étude.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Rotations majoritaires.....</i> | <i>18</i> |
| STATISTIQUES | 20 |
| RESULTATS..... | 23 |
| VALIDATION INDIRECTE DE LA PERTINENCE DU MODELE | 23 |
| EFFETS DE LA MATIERE ORGANIQUE ANIMALE | 25 |
| <i>Analyse de la teneur en Carbone Organique du Sol en 2010</i> | <i>25</i> |
| <i>Analyse de l'évolution de la teneur en Carbone Organique du Sol entre 2000 et 2010</i> | <i>28</i> |
| IMPACTS DES ROTATIONS | 31 |
| DISCUSSION | 34 |
| ANALYSE DES VARIABLES A L'ECHELLE METROPOLITAINE..... | 34 |
| ANALYSE DE L'INFLUENCE DES ROTATIONS | 37 |
| BASES DE DONNEES..... | 38 |
| CONCLUSION | 40 |
| ANNEXES..... | 41 |
| ANNEXE A..... | 41 |
| REFERENCES..... | 44 |
| RÉSUMÉ | 50 |
| ABSTRACT | 51 |

Introduction

En France l'élevage occupe 65 % de la surface agricole utilisée (Pflimlin et al., 2009 ; Steinfeld et al., 2009). Les systèmes de production animale se distinguent par les modalités de gestion du pâturage (Mcsherry et al, 2013) et son intensité (Dernet et al, 2007), l'intégration des prairies dans les rotations (Accoe et al, 2002), la gestion des effluents animaux (Houot et al, 2014) et le type de système d'exploitation (Leifeld et al, 2010). Cette variété de systèmes implique des impacts sur l'environnement différents selon les pratiques. La concentration animale peut montrer des impacts néfastes sur l'environnement (Gaigné, 2012), comme la pollution de l'eau par les nitrates. Mais lorsque l'élevage est moins intense, il apporte de nombreux effets bénéfiques, tels que le maintien de la biodiversité dans certaines zones semi naturelles par le pâturage (Aubin et al., 2016) ou une séquestration de COS plus importante dans les sols (Chabbi et al., 2012). Par ailleurs, de nombreux services écosystémiques sont rendu par les prairies temporaires et permanentes : diminution de l'érosion hydrique, séquestration de COS (Soussana et al., 2004), amélioration de la diversité fonctionnelle (Bretagnolle et al. 2012) et favorisation des zones à haute valeur naturelle (Ryschawy et al. 2015). Toutefois, la spécialisation et la concentrations des systèmes en élevages dans certains territoires (Roguet et al., 2015) ont entraîné une diminution des praires dans d'autres territoires (Perrot et al., 2013; Xiao et al., 2015).

Il se trouve qu'à de grandes échelles (régionales) et au niveau environnemental, les régions d'élevage ont un atout puisqu'elles possèdent des teneurs en COS plus élevées comparativement aux régions de grandes cultures (Paroissien et al., à *paraître*). Cette teneur en COS a une grande importance en agriculture : elle permet une meilleure structuration du sol (impliquant une meilleure aération et infiltrabilité, diminuant l'érosion), une meilleure portance (diminue le tassement), augmente la CEC (fertilité chimique) et augmente l'activité biologique (abrite et nourrit la faune) (Calvet et al., 2015). Ces régions peuvent montrer des interconnexions telles que l'exportation des pailles (pour les litières des animaux d'élevage) ou des céréales (pour l'alimentation des granivores) des régions de grande culture vers les régions d'élevage. Néanmoins, ces différences de teneurs ne pourraient l'expliquer par ces flux de matières organiques. Les différences majeures pouvant moduler les teneurs en COS entre ces deux types de régions sont l'utilisation des effluents d'élevage (Arrouays et al., 2002 ; Houot, 2005 ; Fliessbach et al., 2007), l'intégration des prairies temporaires dans les rotations (Yang et Kay, 2001 ; West et Post, 2002) et la part des prairies permanentes dans la surface agricole (Loveland et Webb, 2003).

Ainsi, les travaux au niveau régional (Sleutel et al, 2003) et national (Bellamy et al. 2005 ; Riley et Bakkegard, 2006) ont analysé les teneurs et les évolutions des teneurs du carbone organique du sol (COS) pour mesurer l'impact des systèmes d'élevage sur les sols. En lien avec l'élevage, certaines diminutions ont notamment été expliquées par la baisse d'épandage de matière organique tel que les fumiers d'élevage (Lettens et al., 2005; Goidts and van Wesemael, 2007; Capriel, 2013). Par ailleurs, d'autres travaux ont corrélé l'évolution de la teneur en COS en Bretagne, au Limousin, au Nord-Pas-De-Calais entre 1980 et 1999 (Lemercier et al. 2006), en Franche-Comté (Saby et al. 2008) et en Alsace entre 1990 et 2009 (Swiderski et al., 2012) avec des variables liées aux pratiques agricoles. Par rapport à l'élevage, les principaux résultats mettent en évidence la diminution des teneurs en COS en lien avec la diminution des prairies (Saby et al. 2008). Cependant, ces travaux ne présentent pas d'aspect évolutif, rendant difficile l'évaluation de

l'impact de l'élevage sur la teneur en COS. L'étude à des emprises régionales ne suffisent pas non plus à appréhender l'impact de l'élevage sur le COS, puisque l'élevage montre des évolutions très différentes selon les grandes régions d'élevage (Dussol et al., 2003 ; Hirschler, à paraître ; Depeyrot et al., 2015).

D'autres travaux plus récents (Paroissien et al., à paraître) ont montré que les évolutions du COS divergent en fonction des périodes et des zones géographiques considérées avec notamment une hausse possible des teneurs dans des zones céréalières. De nombreux facteurs explicatifs ont été mis en évidence à l'échelle nationale : tels que les facteurs climatiques et pédologiques (Paroissien et al., à paraître), les types d'assolements (forêt, vigne, cultures et prairies) (Saby, Brus et Arrouays, 2014), les pratiques culturales (labour, utilisation de l'azote minéral dans la région du grand Ouest) (Issanchou et al., 2017) et dont certaines sont associées aux typologies d'exploitation (Rouquette et Pflimlin, 1995 ; Hirschler, à paraître) : prairies permanentes et les « Surfaces Fourragères Prairiales » (Paroissien et al., à paraître), céréales, maïs, orge (Issanchou et al., 2017). Si des hypothèses peuvent être émises sur les liens entre COS et l'épandage des matières organiques animales et les prairies, aucun travail au niveau métropolitain n'a mis en évidence le lien direct entre le nombre animaux d'élevage et le carbone organique du sol. Paroissien et al., (à paraître) a analysé le lien entre les Unités Gros Bétail (UGB) totaux¹ et l'évolution du COS sans observer d'effet significatif. Cette observation est possiblement le fait que les UGB (calculées à partir des besoins alimentaires), entre les types de cheptels (Bovins, Caprins, Ovins, Volailles et Porcs) n'équivaut pas au même type d'effluent d'élevage (qualité différente) ni à la même quantité (Programme de Maîtrise des Polluants d'Origine Agricole). Les travaux de Martin et al., 2014, ont créé un modèle de prédiction de la teneur en COS. Ils y ont ajouté la matière organique animale (MOA) provenant des données de l'ADEME 2007 à l'échelle départementale en couplant ces données à la matière sèche provenant de Meersmans et al (2012). Les résultats n'ont pas montré d'influence de la MOA sur la teneur en COS, la taille de l'échelle spatiale (départementale) a été considérée comme trop élevée (en comparaison, les données du réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) utilisées pour les données du COS ont une échelle spatiale de 16*16 km²).

En ce sens, les objectifs de ce stage vont être de regrouper et qualifier les sources d'informations exploitables des variables influençant les teneurs en carbone organique du sol. Les trajectoires des territoires (évolution du COS) seront caractérisées par rapport à d'autres variables externes aux jeux de données des covariables explicatives de l'évolution de la teneur en carbone organique des sols. Selon les liens trouvés, les différents territoires et systèmes agricoles en reconquête ou en diminution du COS trouveront en partie une explication à cette évolution.

L'objectif est de fournir aux professionnels des aides à l'orientation, pour guider les conseillers agricoles, qui soient adaptées aux enjeux de maintien ou de restauration de la teneur en carbone organique du sol dans les systèmes de polyculture-élevage bovin ou dans les systèmes spécialisés herbivores bovins. Pour ce, il sera renseigné dans quels intervalles de teneur ou d'évolution du COS les pratiques agricoles agissent à grande échelle.

Dans ce contexte, les facteurs majeurs influant la teneur en COS vont être exposée. À la suite, les bases de données françaises donnant des informations sur ces facteurs et utilisées dans nos analyse vont être présentées. Pour compléter les données existantes, un calcul de la matière organique animale épandue est proposé. Dans cette continuité, une

¹ comprenant les herbivores et les granivores

sélection des cantons est réalisée afin de calculer les rotations à l'aide des données ASP, avec une simplification de ces dernières. Une présentation et discussion de l'analyse des liens de (i) la teneur en COS de 2010 et (ii) de l'évolution de la teneur en COS entre 2000 et 2010 est faite avec les variables pédoclimatiques et agricoles sur tous les cantons de France. Les résultats d'essais d'extrapolation des résultats des rotations à tous les cantons de France à partir des cantons sélectionnés est exposées ainsi que l'analyse (iii) des liens entre la teneur du carbone organique de 2010 et des variables pédoclimatiques et agricoles comprenant les rotations est réalisée avec les cantons issus des calculs de rotation. Ce document se termine par une discussion des limites provenant des bases de données et des traitements.

Synthèse bibliographique

La teneur en carbone organique des sols provient de l'équilibre entre l'entrée et la sortie de matière organique (cf. calcul du bilan humique d'Hénin et Dumont (1945) et le modèle de calcul du bilan humique à long terme AMG de l'Inra de Laon).

Facteurs naturels

Les sorties de matière organique du sol (MOS) proviennent de la minéralisation par l'activité microbienne sous la contrainte de facteurs biotiques et abiotiques (Post et Kwon, 2000). Cette activité est fortement dépendante des facteurs pédoclimatiques tels que la température (Davidson et Janssens, 2006), la pluie (Saiz et al., 2012) et l'argile (Arrouays et al., 2006).

L'influence du climat, notamment par l'intermédiaire de la température et des précipitations, joue un rôle certain dans la séquestration du COS (Gupta et Rao, 1994). En effet, son influence sur la teneur en COS a été quantifiée à 60% dans les régions d'élevage de France (entre 1990 et 2014, où 83% de l'évolution des teneurs a été expliquée) avec des variables climatiques telles que la pluie et la température, leur distribution et écarts dans l'année (Perrot et al., 2013).

La température est considérée comme l'élément principal de minéralisation (Fierer et al., 2005) et elle y est plus sensible que la production primaire nette de la végétation (Kirschbaum, 2000) (quantité donnée de matière organique formée par unité de temps à partir de matière minérale et d'un apport d'énergie). Cependant des facteurs limitants de la minéralisation, comme l'humidité, ont de fortes interactions avec la température. Dans le cas d'une forte pluviométrie et de températures douces (automne et hiver sous nos latitudes), le stockage de carbone est positif dans les sols (Klumpp et al., 2011). Dans le cas de fortes températures, d'un climat sec et d'une production primaire faible, la séquestration diminue et le bilan de séquestration peut être négatif (Ciais et al., 2005). Dans certains cas, lorsque la productivité primaire peut augmenter avec les précipitations, elle augmente aussi les teneurs en COS. De même, l'irrigation d'une prairie permanente va permettre d'augmenter la productivité primaire, mais va augmenter la minéralisation de sorte que l'incorporation de COS sera inférieure à celle observée dans une prairie permanente sans irrigation (Herfurth, 2015).

D'après Perrot et al., 2013 l'altitude contribue à l'explication des teneurs de COS à hauteur de 8%. Dans les systèmes prairiaux, sa contribution s'élèverait à 39,4% (Herfurth, 2015). Ainsi les sols ayant de faibles teneurs de COS se situeraient principalement à des altitudes de moins de 500 m et inversement.

Les matières organiques du sol (MOS) s'associent aux minéraux du sol pour former des complexes argilo-humiques. Sous cette forme, les MOS sont mieux protégées de l'activité des micro-organismes et donc de la minéralisation (Lehmann et Kleber, 2015). Il se trouve que les MOS se lient préférentiellement aux minéraux à granulométrie fine. Ainsi, pour les sols cultivés des régions tempérées, 50 à 75 % du CO (essentiellement sous forme humidifiés) sont associés aux argiles granulométriques (minéraux argileux + oxy et hydroxyde de fer), 20 à 40% aux limons et 10% environ aux sables (essentiellement des débris végétaux en cours de transformation) (Christensen, 1992). Il est ainsi possible de prédire les teneurs en MO potentielles d'un sol en fonction des teneurs granulométriques de celui-ci (Hassink et Whitmore, 1997 ; Dexter et al., 2008).

La nature des sols jouent un rôle très important dans leur capacité à stocker le COS. Chaque type de sol possède dans des intervalles souvent restreints les mêmes caractéristiques qualitatives et quantitatives. Ainsi, les conditions de transformation de la MOS sont semblables pour un même type de sol, puisque ses caractéristiques sont similaires. On peut retrouver pour chaque type de sol des intervalles de teneur en COS (Girard, 2011). En effet, l'appartenance d'un sol à son type explique 7,7% de sa teneur en COS (Herfurth, 2015). Yu et al (2007) ont calculé des valeurs moyennes de COS pour 49 types de sols en Chine, avec des valeurs allant de 14,9 t/ha à 999,9 t/ha.

Facteurs agronomiques

L'occupation du sol est l'un des facteurs explicatifs de la teneur en COS les plus importants (Mulder et al., 2015). Dans les sols agricoles, 20% de la teneur en COS est expliquée (sur 83% d'explication prédite par le modèle) par le type de recouvrement du sol (effet positif des prairies temporaires et surtout permanentes) (Parioissien et al., à paraître). Ainsi le retournement d'une prairie provoque une grande perte de COS (Boiffin et Fleury, 1974 ; Guo et Gifford, 2002; Mondini et Sequi, 2008 ; Poeplau et al., 2011) et inversement, le stock de COS augmente lors de la reconversion d'une culture à une prairie, mais à une vitesse plus faible que la perte (Soussana et al., 2004). Le nombre et la fréquence des cultures peut aussi modifier le stock de COS (Luo et al., 2010).

La protection des matières organiques du sol dans les macro agrégats contre les microorganismes peut être détruite de façon naturelle (lorsque les matières organiques particulières disparaissent) ou par des actions mécaniques anthropiques (Six et al., 1999). Le non retournement du sol laisse les résidus à la surface du sol et permet une meilleure protection des agrégats contre la pluie, permettant une diminution de l'érosion. De plus, la structure du sol n'est pas perturbée (macropores des galeries de vers de terre), ce qui permet une meilleure infiltrabilité de la pluie (Lal et Kimble., 1997). Cependant, malgré les effets positifs théoriques de l'absence de travail du sol, les modélisations à grande échelle tendent à montrer une influence positive du labour sur la teneur en COS. Mais lorsque celui-ci est couplé à une forte application en azote minéral, l'effet semble être négatif (Issanchou et al., 2017).

Dans les sols agricoles, les entrées de MOS proviennent des cultures, laissant leurs racines dans le sol, des chaumes à la surface et des résidus de cultures dans le cas où la plante n'est pas exportée. Ces entrées peuvent provenir aussi des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR). 94% des MAFOR sont composées d'effluents d'élevage de type fumier, lisier ou fientes et le reste des MAFOR sont composées de boues de station d'épuration, de compost de boue ou de compost de déchets urbains et industriels (Houot et al., 2014).

Les effluents d'élevage sont la source principale de MOS pour l'agriculture (Houot, 2005) et leur qualité impacte le stockage de COS (Arrouays et al., 2002). Les effluents d'origine bovine, porcine, avicole n'induisent pas le même

effet sur la biomasse microbienne. Une méta-analyse (Kallenbach et Grandhy, 2011) a démontré que l'effluent le plus efficace pour augmenter la biomasse microbienne est d'origine bovine. Une forte exportation de ces effluents a un fort impact sur les sols pauvres lorsque les apports de ces effluents se font sur une longue durée et ce d'autant plus que la fertilisation azotée est élevée (Smith et al., 2012). Les techniques d'application des effluents déterminent leur placement dans le sol et ont également un fort impact sur leur efficacité (Maguire et al., 2011 ; Ros et al., 2011)

De même, la restitution des pailles dans les régions céréalières s'avère être une pratique très intéressante à envisager pour stocker du carbone dans le sol. En effet, les résidus de récolte peuvent apporter des quantités de matière organique non négligeables : un blé fournit approximativement 9 tonnes de biomasse aérienne (pour un rendement de 90 q/ha), à laquelle il faut ajouter le système racinaire. Ces apports massifs de biomasse, et donc de carbone au sol, sont également importants avec le maïs et le colza (Modélisation de la séquestration de carbone à long terme AMG).

Tableau 1 : Récapitulatif des variables impactant la teneur en carbone organique des sols.

| Variables abiotiques | Variables anthropiques |
|--|--|
| Température (Davidson et Janssens, 2006) : moyenne annuelle, distribution et écarts dans l'année | Occupation du sol (Mulder et al., 2015) : ex. : importance des prairies |
| Pluie (Saiz et al., 2012) : moyenne annuelle, distribution et écarts dans l'année | Nombre et la fréquence des cultures (Luo et al., 2010) |
| Altitude (Perrot et al., 2013) | Actions mécaniques anthropiques (Six et al., 1999) |
| Teneur en argile (Arrouays et al., 2006). | Retournement du sol (Issanchou et al., 2017) |
| Type de sol (Yu et al., 2007 ; Girard, 2011 ; Herfurth, 2015). | Fertilisation minérale (Issanchou et al., 2017) |
| | Résidus de culture |
| | Matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) (Arrouays et al., 2002 ; Houot, 2005 ; Kallenbach et Grandhy, 2011 ; Houot et al., 2014) |
| | Techniques d'application des effluents (Maguire et al., 2011 ; Ros et al., 2011) |

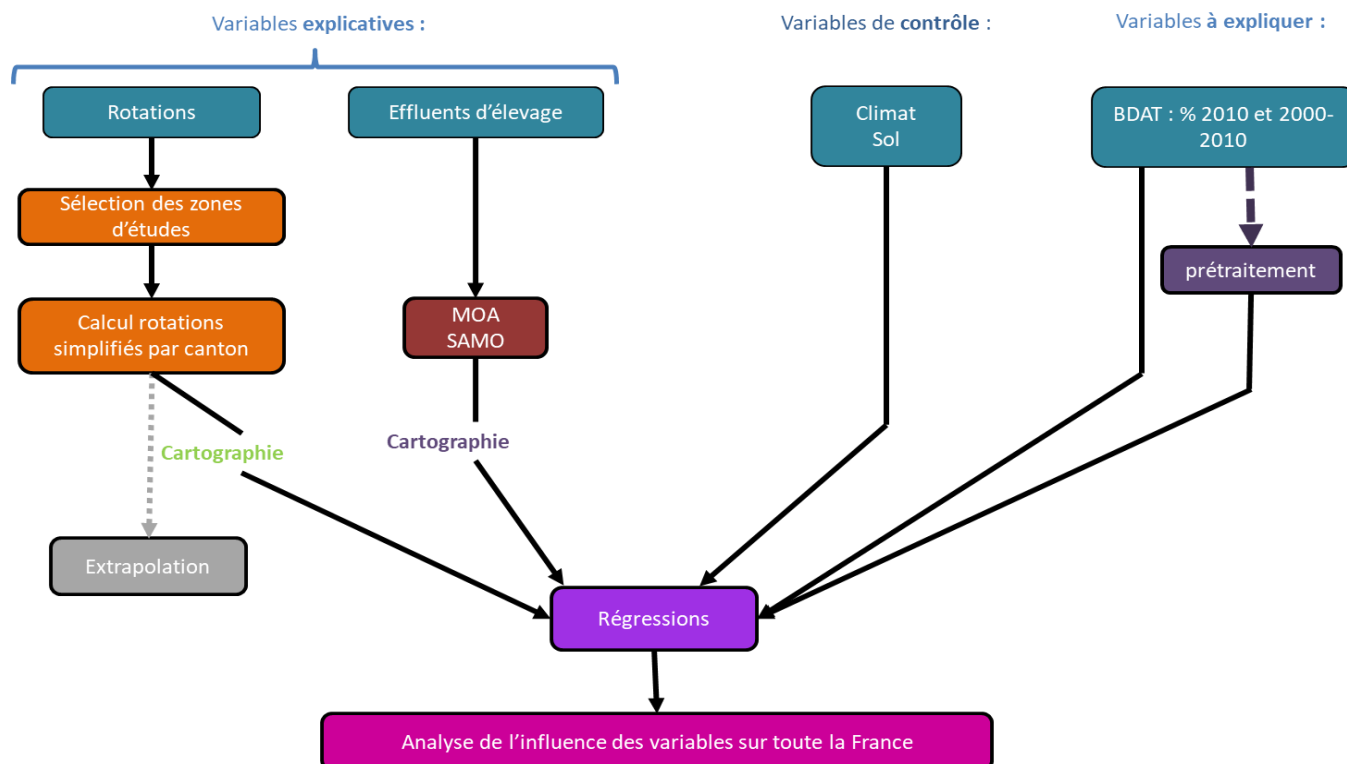
Matériels et méthodes

Démarche

Il manque un paragraphe introductif qui préciserait la méthode générale utilisée, les hypothèses faites et qui justifierait le choix des variables construites.

L'étude de la relation entre les teneurs en carbone organique des sols agricoles (COS) et la présence des systèmes de polyculture élevage est organisée en quatre étapes :

- Recherche des bases de données exploitables ;
- Calcul de la matière organique animale et sa répartition : n'existent pas à l'échelle du canton ;
- Sélection des zones d'étude pour le calcul des rotations : nécessaire car aucune donnée n'est trouvée ;
- Analyse de l'influence des variables agricoles sur la teneur en COS.



3

Figure 1 La démarche d'analyse.

L'attention sera apportée au fait que toutes les variables analysées à grande échelle, aient les mêmes impacts sur la teneur en COS que précisé dans la bibliographie, ainsi que de montrer l'influence à partir d'une grande emprise, de la matière organique animale épandue et des rotations sur la teneur en COS. Une comparaison de l'analyse du lien entre la teneur en COS et les variables de contrôle et explicative sera réalisée entre les analyses provenant de l'ensemble des cantons de France et ceux des cantons issus du prétraitement.

Bases de données

Pour répondre à notre problématique, nous mobilisons l'usage de grandes bases de données nationales, provenant soit de mesures directes échantillonnées sur le terrain, soit de variables calculées à partir de mesures. Toutes les variables contenues dans ces bases de données n'ont pas été utilisées. La liste des variables sélectionnées et construites pour conduire nos analyses sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 2 : Variables utilisées pour le suivi de la teneur en carbone organique des sols (par canton).

| Nom des variables | Variable de pression | Variable d'état | Variable de réponse | Résolution spatiale | Résolution temporelle | Source |
|---|----------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------|
| Médiane/moyenne COS | | oui | oui | Canton | 2000-04 et 2010-14 | BDAT |
| Moyenne de COS par type d'occupation des sols | | oui | oui | Région | 2000-2010 | BDAT + RGA |
| Texture (argile, limon et sable) | | oui | | Canton | 2000-2010 | BDAT |
| Nature et surface des cultures | oui | oui | | Canton | 2000 et 2010 | RA |
| Typologie de l'élevage | oui | oui | | Canton | - | Rouquette et |

| | | | | | | |
|--|-----|-----|--|-------------|--------------|-----------------------------------|
| | | | | | | Pflimlin, 1995 |
| Suivis des cultures par îlot | oui | oui | | Canton | 2007 à 2014 | RPG |
| Effectifs animaux | oui | oui | | Canton | 2000 et 2010 | RA |
| Valeur des UGB | | oui | | - | - | Idèle |
| Durée de présence dans les bâtiments | | oui | | région | 2007 | PMPOA projet 2007 |
| Part en fumier et en lisier | | oui | | région | 2007 | PMPOA projet 2007 |
| Tonnage en lisier/fumier par UGB/individu | | oui | | - | - | Idèle |
| Matière sèche des effluents d'élevage | | oui | | - | - | ITP, ITAVI, Institut de l'élevage |
| Surface amendée en matière organique (SAMO) | oui | oui | | Région | 2007 | PMPOA projet 2007 |
| Nature des sols | oui | oui | | 1/1 000 000 | - | INRA |
| Données météorologiques | oui | oui | | Canton | 1970-2010 | Joly et al., 2010 |
| Typologie du climat | oui | oui | | Canton | 1970-2000 | Joly et al., 2010 |

Les plages temporelles considérées sont au nombre de quatre : 1995-1999, 2000-2004, 2005-2009 et 2010-2014. Ces plages correspondent à la mise à disposition des données de la BDAT sur le site internet (bdat.gissol.fr). Les résultats d'analyses stockées dans la BDAT proviennent d'échantillons de sols prélevés entre 0 et 25 cm en moyenne pour les sols de culture et 5 à 15 cm pour les sols de prairie (Schvartz et al., 1997). Les teneurs en COS utilisées dans cette analyse sont obtenues par dosage spectrométrique après oxydation dans un milieu sulfochromique (méthode Anne norme AFNOR X 31-109 (Afnor, 1999)). Dans l'objectif d'analyser l'effet des variables agricoles sur le long terme, la plage temporelle de 2000 à 2004 sera uniquement comparée à celle de 2010 à 2014 pour mettre en évidence des effets qui ont un impact parfois lent sur les teneurs en COS. La résolution spatiale la plus fine de l'ensemble des données de l'étude est le canton. La plage de 1990-1994 est écartée en raison de son trop faible nombre de résultats d'analyses en Normandie et dans le Massif Central et celle de 1995-1999 n'a pas de correspondance avec les données de (RA).

Carbone organique des terres agricoles

Le prétraitement des données de la BDAT a pour objectif de diminuer les biais liés à l'échantillonnage aléatoire et non maîtrisé. Les cantons étudiés sont choisis par rapport au nombre d'analyses de carbone organique faites sur la SAU moyenne de chaque canton. La SAU moyenne est déterminée à partir des données des deux RA (2000 et 2010). Ce premier critère de sélection permet de discrétiser le nombre d'échantillons d'analyse de terres en fonction de la surface de terres cultivées. Il a été choisi en utilisant le seuil de 50 échantillons par cantons (trouvé comme permettant de ne pas faire d'écart à la moyenne). Le seuil moyen équivaut à un échantillon pour 1,45km² soit 145 hectares.

Le deuxième critère de sélection est l'analyse de l'évolution de la granulométrie (limon et sable) qui a été testée dans le but d'écarter les cantons qui en montraient une. On suppose que si pour un même canton, des évolutions de la granulométrie apparaissent, alors les analyses entre les deux périodes de temps représentent des sols différents. Les teneurs en argile ne sont pas utilisées, car elles peuvent montrer des biais de mesure pour des sols différents, proches

géographiquement mais nécessitant des méthodes différentes d'estimation du taux d'argile (Degan et al., 2016). Cette étape ne peut pas être réalisée pour deux raisons :

- Un trop faible nombre de cantons possèdent des données granulométriques ;
- Les cantons possédant ces données, ont en moyenne cinq fois moins d'analyses de la granulométrie que d'analyses de la teneur en COS. Les échantillons sont représentés de manière différente pour ces trois variables et l'effectif d'analyses par canton (moyenne inférieure à 10 pour tous les cantons) est trop faible pour obtenir une moyenne fiable de chaque granulométrie.

Apports de Matière Organique Animale (MOA)

Une base de données nous informe de la quantification des effluents d'élevage à l'échelle départementale (ADEME 2007). Cependant cette échelle s'est montrée trop imprécise pour établir un lien entre cette dernière et la teneur en COS. De plus, d'autres bases de données donnent le nombre d'UGB à l'échelle du canton, mais cette variable n'a montré aucun lien avec la teneur en COS, qui est certainement le fait de la mauvaise correspondance entre les granivores et les herbivores en regard de leur production d'effluents. Ainsi, il semble nécessaire de calculer la quantification des effluents en fonction des types de cheptels, puis de préciser ces calculs par rapport à leurs taux de matière organique et remis à l'hectare pour obtenir des variables ayant un lien plus direct avec la teneur en COS. De plus, nous préciseront le type d'effluents (fumier et lisier) ainsi que sa destination (épandue sur prairie et sur culture) pour obtenir des variables ayant un lien plus direct avec les analyses de la teneur en COS faites sur le terrain.

L'évolution de la matière organique est calculée à partir des RA de 2000 et 2010. Les effectifs des différents types de cheptels herbivores sont ceux des vaches laitières, des vaches allaitantes, des autres bovins, des brebis, des autres ovins, des chèvres et des autres caprins. Les effectifs des granivores sont ceux des truies, des porcs d'engraissements et des volailles. La matière organique animale a été calculée de deux équations différentes pour les ruminants et les granivores. La MOA des herbivores (MOAh) est calculée suivant ces trois formules :

$$\text{MOAh} = \text{MOAh provenant du fumier} + \text{MOAh provenant du lisier}$$

Où : $\text{MOAh provenant du fumier} = \text{cheptels} \times \text{UGB}^2 \times \text{sa durée de présence dans les bâtiments} \times$
 $\text{part en fumier} \times \text{tonnage du fumier pour l'UGB} \times \text{taux de matière sèche}$

$\text{MOAh provenant du lisier} = \text{cheptels} \times \text{UGB} \times \text{sa durée de présence dans les bâtiments} \times \text{part en lisier} \times$
 $\text{tonnage du lisier pour l'UGB} \times \text{taux de matière sèche}$

La MOA des brebis, autres ovins, chèvres et des autres caprins est constituée uniquement par du fumier. Dans les OTEX (de 2000), la mention lisier correspond aux eaux blanches (déchets organiques provenant de la transformation du lait).

La matière organique animale des granivores (MOAg) est calculée suivant ces trois formules :

$$\text{MOAg} = \text{MOAg provenant du fumier} + \text{MOAg provenant du lisier}$$

² UGB : Unité Gros Bétail, dont les valeurs correspondent aux besoins nutritifs des animaux (définition utilisée par l'Idèle)

Où : $MOAg \text{ provenant du fumier} = \text{cheptels} \times \text{tonnage du fumier par animal} \times$
 $\text{sa durée de présence dans les bâtiments} \times \text{part en fumier} \times \text{taux de matière sèche}$
 $MOAg \text{ provenant du lisier} = \text{cheptels} \times \text{tonnage du lisier par animal} \times$
 $\text{sa durée de présence dans les bâtiments} \times \text{part en lisier} \times \text{taux de matière sèche}$

En ce qui concerne les truies et porcs d'engraissement, leur durée de présence dans les bâtiments est considérée comme totale dans l'année et leurs effluents sont calculés uniquement en lisier. Pour les volailles, on répartit 60% des effluents comme étant des fumiers et 40% comme étant des lisiers (fientes et lisiers) et ce pour toutes les régions. Cette simplification des données de l'enquête bâtiments résulte des incertitudes très importantes concernant les espèces qui sont produites dans les différentes catégories (poules pondeuses ou à viande, dindes, pintades...) et à la fluctuation des effectifs (importante selon la demande).

La matière organique animale totale est calculée en additionnant la matière organique animale totale des herbivores avec la matière organique animale totale des granivores.

Pour finir, l'amendement en matière organique est discriminé selon les types d'occupation du sol (prairies et grandes cultures). Ces données proviennent des surfaces amendées en matières organiques (SAMO) par OTEX (Bovins lait, bovins allaitants, autres bovins, petits ruminants et granivores), disponibles dans le projet Programme de Maîtrise des Polluants d'Origine Agricole de 2007 (PMPOA) (Institut de l'élevage, 2007). Elles fournissent la proportion de matière organique amendée sur le maïs, la prairie, les céréales et les tiers (proportion fournie à une autre exploitation). En ce qui concerne la catégorie « tiers », l'occupation du sol n'est pas connue et sera par défaut assimilée aux céréales. En effet, cette dernière catégorie est très anecdotique sauf chez les granivores (et plus particulièrement en Bretagne). A dire d'expert, en Bretagne, les exploitations atteignent souvent la limite réglementaire de 170 unités d'azote organique par hectare et les effluents sont très souvent épandus sur des champs de céréales d'autres exploitations (Excédent structurel de Norga fixé à 170kg de N épandable Directive nitrates). Ainsi, la classification « tiers » sera regroupée avec celle des céréales. De même, la classification « maïs » sera regroupée avec celle des céréales. Ainsi sont conservées deux types surfaces étant amendés : les prairies et les cultures. La quantité de matière organique amendée sur culture par hectare est calculée telle que :

$$\text{MOA sur culture par hectare} = \frac{\sum \text{MOA totale de chaque type de cheptel} \times \text{SAMO grande culture}}{\text{SAU}^3 \text{ (grande culture)}}$$

La quantité de matière organique amendée sur prairie par hectare est calculée telle que :

$$\text{MOA sur prairie par hectare} = \frac{\sum \text{MO totale animale de chaque type de cheptel} \times \text{SAMO prairie}}{\text{SAU (surface fourragère prairiale)}}$$

Les données de la SAMO étant des données régionales, son utilisation a certainement tendance à lisser les données pour les cantons d'une même région ou à créer des biais. Une autre proposition de calcul, est basée sur la pondération de la proportion des grandes cultures/prairies aux niveaux cantonal et régional (pondération utilisée Issanchou, 2017) telle que :

$$\text{SAMO pondéré cantonale pour les GC} = \text{SAMO régionale} \times \frac{\text{proportion des GC du canton}}{\text{proportion des GC de la région}}$$

³ SAU : Surface Agricole Utile

$$SAMO \text{ pondéré cantonale pour les prairies} = SAMO \text{ régionale} \times \frac{\text{proportion de la SFP du canton}}{\text{proportion de la SFP de la région}}$$

Où GC = Grandes Cultures et SFP = Surface Fourragère Prairial.

Cependant, l'utilisation d'un facteur de correction est nécessaire. En effet l'addition des SAMO cantonales de grandes cultures avec celui de la prairie donnait un résultat environ égale à un [0,7 ; 1,2]. Ainsi, l'opération suivante a été réalisée pour chaque canton :

$$SAMO \text{ pondérée cantonale pour les GC} + SAMO \text{ pondéré cantonale pour les prairies} = A$$

$$SAMO \text{ cantonale rectifiée pour les cultures} = \frac{SAMO \text{ pondéré cantonal pour les GC}}{A}$$

$$SAMO \text{ cantonale rectifiée pour les prairies} = \frac{SAMO \text{ pondéré cantonal pour les prairies}}{A}$$

Après vérification, la somme des deux SAMO cantonales rectifiées est bien égale à un.

Le calcul de la répartition des MOA sur culture et sur prairie est réalisée à l'aide la même formule qu'avec les SAMO régionales mais remplacées par les SAMO cantonales. Pour finir, la somme de la quantité de matière organique épanchée sur les prairies et sur les grandes cultures a été faite, puis comparée à la MO totale animale pour chaque canton avec un pourcentage d'erreur tel que :

$$\text{Pourcentage d'erreur} = \left(\frac{MOA \text{ totale} - (MOA \text{ sur GC} + MOA \text{ sur prairies})}{MOA \text{ totale}} \right) * 100$$

Après vérification, tous les pourcentages d'erreur sont de 0 %.

Les Cartes de la MOA (totale, son évolution, épanchée sur cultures et prairies sont présentées en annexes).

Occupation du sol et rotations

L'objectif de cette partie est de sélectionner les cantons pour calculer leur rotation. En effet, les calculs nécessaires à partir du RPG étant chronophages et la durée du stage limité, les rotations sont calculées pour un nombre limité de cantons. Par ailleurs, un certain nombre de biais d'échantillonnage (nombre d'analyses représentant mal les sols d'un canton ou différemment selon les périodes d'échantillonnages) puisque la loi des grands nombres ne peut être utilisée (données sur les rotations calculées pour un nombre de cantons limités).

Pour ce faire, nous allons procéder comme suit :

- Obtenir des valeurs de médianes fiables de teneur en COS pour chaque canton (sélectionnées par l'étape de Prétraitement) ;
- Maximiser l'homogénéité des variables pédoclimatiques par canton pour attribuer l'évolution de la médiane du COS au seul fait des variables étudiées et non d'une différence de représentabilité des analyses de sol entre deux campagnes ;
- Obtenir des cantons ne montrant pas d'évolution des assolements afin d'attribuer un seul ensemble d'assolements aux rotations calculées.

Zones d'étude

Premier tri : les zones d'élevage

Le zonage de grandes régions d'élevage (Rouquette et Pflimlin, 1995) est construit selon un ensemble de critères fondés sur l'occupation du sol et le contexte pédoclimatique. Les cantons sélectionnés pour l'étude concernent les zones en polyculture-élevage et en système spécialisé herbivore bovin, donc hors zones en grandes cultures, zones de haute montagne et zones pastorales.

Deuxième tri : occupation du sol hors polyculture élevage

Les cantons ayant une surface supérieure à 5% de la SAU en vergers, vignes ou maraîchage sont écartés de l'analyse. En effet, ces types des systèmes ne sont pas concernés par la problématique de l'étude. Par ailleurs, les vignes et les vergers ont des sols très pauvres en MO (Tableau 10). La prise en compte de ces surfaces pourrait baisser la moyenne en MOS des cantons sélectionnés pour l'étude. Les données du RA fournissent les surfaces en vergers, ou vignes ou maraîchage par canton.

Troisième tri : Zones pédoclimatiques homogènes

Un recoupement géographique est réalisé entre la carte au 1/1 000 000 des sols de France (60 types de sols ou STU⁴) et la carte des cantons. Ensuite, une concaténation est réalisée entre le type de climat et le type de sol par canton pour obtenir des unités pédoclimatiques (UPC) du type « typologie du climat ~ type de sol ». Pour finir, les cantons possédant moins de 80% d'une même unité pédoclimatique sont écartés de l'analyse (valeur choisie pour maximiser le nombre de cantons conservés car cette étape est très sélective et pour maximiser l'homogénéité des UPC).

Quatrième tri : évolutions de l'occupation du sol et de la présence animale

Les évolutions de l'occupation du sol sont estimées à partir des données du RA. Pour ne pas calculer des rotations en pleine évolution, nous émettons l'hypothèse que si l'occupation du sol du RA n'évolue pas, les grands types de systèmes de culture, définis à partir des rotations, n'évoluent pas non plus. Un changement d'occupation du sol est considéré comme une évolution si la surface d'au moins un type d'assolement au niveau du canton est supérieure ou inférieure au seuil +/- 7,5 % de SAU. Ce seuil est défini pour avoir un nombre suffisant de cantons avec ou sans évolutions pour les trois périodes considérées (2000-2010, ainsi que 1988-2000 et 1988-2010 pour éviter les effets à retardement du retournement des prairies sur l'évolution du COS au long terme, tels que ceux mis en évidence par Paroissien et al., *à paraître*). Les cantons possédant une évolution de +/- 7,5% sont écartés de l'analyse.

Afin d'appuyer l'hypothèse précédente, nous considérons que si la charge animale ne change pas, la gestion de l'affouragement ne changera pas non plus et de ce fait les cultures appartenant aux groupes du RA sont peu susceptibles de changer. Pour calculer le seuil permettant de considérer un canton comme ayant une MO animale évoluant significativement entre 2000 et 2010, on utilise le seuil de 5% du dernier décile de la MOA totale de l'année 2010 (et non le maximum car il y a des valeurs très hautes). Cela correspond à une valeur de 0,214 tonne de matière sèche organique animale par hectare et par an (t/MS de MOA/ha/an). Les cantons possédant une évolution de +/- 0,214 t/MS de MOA/ha/an sont écartés de l'analyse. La carte des cantons sélectionnés se trouve en annexe.

Rotations majoritaires

Un calcul des rotations est réalisé. Dans une première étape, des tableaux des rotations attribuées à chaque parcelle va être effectuée à l'aide de RPG Explorer. Dans une deuxième étape, le calcul du pourcentage des rotations simplifiées est réalisé pour chaque canton.

Etape 1 : Création du tableau des assolements

⁴ Soil Typological Units

Le logiciel RPG Explorer 1.9.5.0 a été utilisé pour créer les données de filiation des différentes parcelles à partir des données de l'Agence de services et de paiement (ASP) de niveau 4 (niveau nécessaire pour garantir la meilleure fiabilité des résultats). Après une étape d'importation des fichiers de l'ASP (de l'année 2007 à 2014 pour chaque département nécessaire), le logiciel réalise un recoupement géographique pour chaque année lors de l'étape de « filiation des îlots ». Les îlots sélectionnés sont ceux ayant une surface intersectant la couche du département avec celle d'un territoire, territoire qui correspond ici aux cantons sélectionnés. La méthode de filiation choisie est « Intersection successive des formes des îlots sur l'ensemble des années » dans l'ordre chronologique d'intersection des années. Le seuil de conservation des îlots qui intersecte la bordure du territoire est de 50%. Les surfaces inférieures à moins de 500 m² et possédant un seuil IF (représentant l'allongement d'une parcelle) de moins de 0,005 ont été éliminées : ces seuils sont généralement choisis par défaut pour supprimer les défauts de recoupement géographique (cf. notice de RPG Explorer 1.9.5.0). Les îlots ou portions d'îlot qui apparaissent/disparaissent intégralement sont compris dans les analyses. Une vérification de la SAU totale avec celle de RA a été réalisée pour observer si les bases de données correspondent entre elles et vérifier les sorties du logiciel.

A la suite de ces recoupements, est réalisée l'étape de « reconnaissance des séquences ». Cette étape consiste à faire correspondre pour chaque îlot/portion d'îlot, un groupe de culture pour chaque année et d'en donner la séquence culturale (l'absence de donnée est aussi précisée). Ces étapes de reconnaissance des séquences ont été choisies comme suit:

- Une culture par îlot et par an ;
- Surfaces égales entre les deux années ;
- Agrégation/désagrégation à surfaces égales ;
- Identification des cultures pérennes comprenant les groupes de cultures 11 (gels sans production), 18 (prairies permanentes), 20 (vergers), 21 (vignes) et 27 (arboriculture). Les gels et notamment les prairies permanentes sont pertinentes à considérer au vu de notre problématique. Les prairies permanentes concernent un point essentiel de l'analyse puisque les dénominations prairies temporaires et permanentes (prairie supérieure à 5 années) sont parfois biaisées. Des interdictions de retournement des prairies permanentes ont conduit certains agriculteurs à ne pas déclarer leur parcelle comme une prairie permanente mais comme une prairie temporaire.

Ainsi, on peut observer sur les tables de sortie des prairies temporaires qui occupent la parcelle 8 ans d'affilée ou des prairies permanentes passer en prairies temporaires sans jamais accueillir d'autres cultures

- Surfaces égales à X pourcent
- Agrégation/désagrégation à surface égales
- Agrégation/désagrégation à surface X pourcent
- Une culture par îlot et par an.

Les paramètres de reconnaissance choisis sont des reconnaissances d'une année sur l'autre (reconnaisances des années deux à deux), dans l'ordre chronologique d'obtention des séquences. Les séquences qui ne durent pas 8 années sont aussi prises en compte.

Les étapes suivantes d'affectation et de génération des assolements de rotation du RPG Explorer n'ont pas été réalisées. En effet, l'étape d'affectation des cultures aux identifiants ASP demande une recherche très précise auprès

des chambres agricoles pour tous les cantons étudiés. Il est possible de compléter le pourcentage que prennent certaines cultures parmi son identifiant ASP (soit le pourcentage d'une culture parmi son groupe de culture) grâce au recensement agricole de 2010 (maïs grain, maïs ensilage, colza et soja), mais cette opération n'a pas été réalisée car nous n'avons pas jugé pertinent de réaliser cette opération pour une petite partie des groupes de cultures (complète un groupe et partiellement un deuxième sur dix-sept). Par ailleurs, la génération des assolements de rotation nécessite de remplir deux autres tableaux demandant une expertise agronomique différente pour chaque canton, ce qui représente une base de données très chronophage à réaliser. Dans le cas où les informations agronomiques sont faussées, les rotations majoritaires calculées le seront aussi. De plus, ces données modulent très fortement les calculs de rotation selon les logiques agronomiques académiques (ce qui ne correspond pas toujours à la réalité).

Etape 2 : Calcul des rotations simplifiées

Pour obtenir une variable descriptive des rotations simple à utiliser, des traitements ont été réalisés à partir des sorties de RPG explorer.

Pour commencer, toutes les cultures ne concernant pas les surfaces de polyculture élevage ont été regroupées et ignorées dans nos analyses. Les autres cultures ont été regroupées ensemble selon leur famille botanique et selon les résidus qu'elles sont susceptibles de fournir au sol après récolte. Pour chaque parcelle, la présence (sans prendre en compte les répétitions) des cultures lors de ces huit années a été retenue : la raison de ce traitement est de simplifier la donnée. En effet il est compliqué de regrouper des rotations identiques mais décalées dans le temps, même à partir des têtes de cultures. De plus, des rotations similaires mais non strictement semblables ne seront pas regroupées (par exemple dans le cas d'une répétition d'une seule culture dans la rotation, ou de l'absence de données pour une année). Une dernière étape consiste à créer une typologie des types de rotations, pour synthétiser la diversité des rotations de tous les cantons traités. Leurs caractéristiques sont représentées dans le Tableau 2.

Tableau 3 Les rotations simplifiées.

| Type de rotation | Caractéristiques |
|------------------------------------|--|
| « prairie » | Contient uniquement le groupe de culture « prairie permanente » Contient uniquement le groupe de culture « prairie temporaire » Contient uniquement les groupes de cultures « prairie permanente » et « prairie temporaire » |
| « longue avec prairie temporaire » | Contient au moins trois groupes de cultures différentes contenant les groupes « prairie temporaire » et/ou « prairie permanente » |
| « longue » | Contient au moins trois groupes de cultures différentes sans les groupes « prairie temporaire » et/ou « prairie permanente » |
| « courte » | Groupe ne contenant qu'un ou deux groupes de culture sans les groupes « prairie temporaire » et/ou « prairie permanente » |

En ce qui concerne les rotations « longues avec prairie temporaire » : ces groupes peuvent contenir tout simplement des retournements de prairie suivis de cultures et non des rotations longues avec prairie temporaire (ou l'inverse). Cependant, les cantons traités ont été sélectionnés pour ne pas montrer d'évolution de leur assolement. Le pourcentage de la surface des prairies sur la SAU ne peut alors que faiblement diminué, ce facteur est donc très limité.

Statistiques

Les traitements statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel R et de l'interface utilisateur Rstudio Version 1.0.136. Les packages utilisés pour calculer les statistiques descriptives et les ACP sont : *ade4*, *factoextra*, *ggplot2* et *FactoMineR*. Les packages utilisés pour les régressions linéaires sont : *car*, *caret*, *foreign*, *mlogit*, *AER*, *Hmisc*, *aod*, *questionr*, *nlme*, *sandwich*. Les packages utilisés pour la gestion de données sont : *magrittr* et *dplyr*.

Nos hypothèses de départ de l'analyse des variables est la mise en évidence (i) de l'influence identique avec les travaux analysant à grande échelle des variables de contrôle et une partie des variables d'occupation de la SAU (maïs, prairie temporaire et permanente, vigne et vergers) sur la teneur et l'évolution du COS ainsi que (ii) d'un lien identique avec les travaux analysant à de faibles échelles (parcellaires) entre les variables d'occupation du sol (céréales, oléagineux, préagineux, maraichage et horticulture) et les variables de MOA avec la teneur ou l'évolution du COS.

Les variables que nous cherchons à expliquer sont les suivantes : l'évolution du COS, la teneur en COS de 2010. Dans un second temps nous cherchons à expliquer l'évolution du pourcentage de SAU occupée par le maïs fourrager et des prairies temporaires pour mieux comprendre certains liens entre variables.

L'influence des variables agricoles et pédoclimatiques sur les variables à expliquer a été estimée suivant ces étapes :

- Suppression des variables corrélées entre elles : cette étape a conduit à la suppression de plusieurs variables météorologiques, de séparer les analyses entre la MOA, la MOA calculée avec les SAMO régionales et la MOA calculée avec les SAMO cantonales ;
- Régression linéaire multiple selon la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO ou OLS) ;
- Test de l'homoscédasticité ;
- Test de la normalité (Test de Shapiro) ;
- Régression GLS (moindre carré généralisé) si les hypothèses d'homoscédasticité (toujours rejetée) et de distribution normale de la population (jamais rejetée) sont rejetées.

Les régressions GLS (Generalized Least Squares) calculées sont :

A. Pour l'échantillon des **78 cantons** :

1. Teneur en COS 2010 = variables de contrôle + variables d'occupation de la SAU + SAMOh sur culture et sur prairie + SAMOg sur culture et sur prairie + rotations

B. Sur tous les cantons et sur les cantons issus du prétraitement : avec la teneur en COS 2010 comme variable explicative :

Teneur en COS 2010 = variable de contrôle + variables d'occupation de la SAU + SAMOh sur culture et sur prairie + SAMOg sur culture et sur prairie

Teneur en COS 2010 = variable de contrôle + variables d'occupation de la SAU + MOAh **tot** + MOAg **tot**

C. Sur tous les cantons et sur les cantons issus du prétraitement : évolutions du COS 2000-2010 comme variable explicative :

Evolutions du COS = variable de contrôle + variables d'occupation de la SAU + SAMOh sur culture et sur prairie + SAMOg sur culture et sur prairie

Evolutions du COS = variable de contrôle + variables d'occupation de la SAU + MOAh **tot** + MOAg **tot**

Evolutions du COS = variable de contrôle + variables d'occupation de la SAU + MOAh **fumier** + MOAh **lisier** + MOAg **fumier** + MOAg **lisier**

Des équations de prévalidation du modèle ont été réalisées dans le but de vérifier le lien de certaines variables avec les COS mis en évidence dans des recherches antérieures mais ne pouvant être analysées avec l'ensemble des variables.

Teneur en COS de 2010 = Types de sol (au nombre de 60, sur l'ensemble des cantons)

Teneur en COS de 2010 = Unités PédoClimatiques (au nombre de 259, sur l'ensemble des cantons)

Teneur en COS de 2010 = Unité Climatiques (au nombre de 8, sur l'ensemble des cantons)

Teneur en COS de 2010 = variable de contrôle + variables d'occupation de la SAU + SAMOh sur culture et sur prairie + SAMOg sur culture et sur prairie + P.O. de la vigne (1025 cantons)

Teneur en COS de 2010 = variable de contrôle + variables d'occupation de la SAU + SAMOh sur culture et sur prairie + SAMOg sur culture et sur prairie + P.O. de l'horticulture (543 cantons)

Teneur en COS de 2010 = variable de contrôle + variables d'occupation de la SAU + SAMOh sur culture et sur prairie + SAMOg sur culture et sur prairie + P.O. du maraîchage (1213 cantons)

Teneur en COS de 2010 = variable de contrôle + variables d'occupation de la SAU + SAMOh sur culture et sur prairie + SAMOg sur culture et sur prairie + P.O. des vergers (2237 cantons)

Les variables d'occupation de la SAU sont celles des céréales, oléagineux, maïs fourrage, prairie temporaires, surface toujours en herbe, du maraîchage, de l'horticulture, des vignes et des vergers.

Les variables de contrôle sont la granulométrie du sol (argile, limon et sable), les types de sols, les unités pédoclimatiques et des données météorologiques (typologie du climat, température moyenne annuelle, Jours/an de minimum inférieur à -5°C et supérieur à plus de 30°C, l'amplitude thermique annuelle, la variabilité interannuelle de la température (VIT) et des précipitations (VIP) pour les mois de Janvier et de Juillet, le cumul annuel de précipitation, la spécificité pluviométrique du mois de Janvier et de Juillet (Ecart des cumuls du mois par rapport à la moyenne annuelle des cumuls mensuels), le nombre de jours de précipitation en Janvier et en Juillet et le rapport de la pluviométrie aux mois de Septembre et Octobre sur celui de Juillet). Les variables retenues (car non corrélées entre elles) sont :

- Soit : le nombre de jours chauds, de jours froids, la variabilité interannuelle de la température et de la pluie pour le mois de Juillet, le cumul annuel de précipitation, la spécificité pluviométrique du mois de Janvier, la teneur en argile et en limon.
- Soit : le nombre de jours chauds, la variabilité interannuelle de la température pour le mois de Juillet, la variabilité de la pluie pour les mois de Janvier et de Juillet, l'altitude, la teneur en argile et en limon.

Les résultats des rotations obtenues à partir des 78 cantons sont extrapolés à tous les cantons de France en utilisant deux méthodes différentes : la méthode de l'Analyse par Composantes Principales (ACP) (extrapolation par géométrie dans l'espace) et en utilisant l'estimateur SUR⁵ (Seemingly Unrelated Regression) (extrapolation par modélisation à l'aide de plusieurs régressions GLS, où les liens existants entre elles sont pris en compte dans l'évolution de chacune) :

- Tout d'abord, une analyse de la représentativité de l'échantillon (78 cantons) par rapport à la population (tous les cantons de France) est réalisée par le test de différence ainsi qu'en faisant une description par des boxplots de la structure des moyennes du pourcentage d'occupation de cultures entre les cantons sélectionnés et les cantons de toute la France.

⁵ SUR : comprend plusieurs relations individuelles liées par le fait que leurs perturbations/erreurs sont corrélées.

- La méthode 1 consiste à extrapoler le pourcentage de chaque rotation simplifiée pour chaque canton en utilisant les coordonnées des rotations projetées sur une ACP et les coordonnées projetées de l'ensemble des cantons sur la même ACP. Le pourcentage des assolements des groupes de culture (variable active) des individus (78 cantons) sont projetés sur une ACP. Suite au calcul de l'ACP, des variables supplémentaires/passives (rotations simplifiées) ainsi que des individus supplémentaires (assolements des cantons de toute la France) sont projetés sur l'ACP. On extrait les coordonnées sur les cinq axes des individus supplémentaires : les coordonnées des 5 axes d'un canton sont multipliées par les coordonnées de la rotation puis la somme de ces cinq multiplications donne l'approximation de la rotation pour un canton.
- La méthode 2 consiste à réaliser une régression linéaire par l'estimateur SUR (packages : nnet, mgcv, quantreg, systemfit, foreign, car, foreign, systemfit) de chaque type de rotation en fonction des assolements.
- Vérification des résultats en comparant le pourcentage du type de rotation « prairie » avec la STH (Surface Toujours en Herbe) du recensement agricole : création de boxplots de la différence entre la prédiction et la valeur du RA pour les méthodes 1 et 2.

Résultats

Validation indirecte de la pertinence du modèle

Certaines variables (et notamment des variables de contrôle) n'ont pas pu être analysées en même temps que l'ensemble des variables. Trois raisons en sont la cause :

- le nombre de cantons possédant les données est limité (variables d'occupation du sol hors polyculture élevage) ;
- les variables avaient plusieurs modalités pour un même canton (pour les types de sols et les unités pédoclimatiques, donnant des cantons ayant différentes pondérations dans les analyses) ;
- il y avait des corrélations (entre les unités climatiques et les variables du climat utilisées).

Afin de vérifier avec les bases de données utilisées et grâce à notre modèle, des liens mis en évidence dans d'autres études entre ces variables de contrôle et la teneur en COS, des régressions sont réalisées. Si les liens mis en évidence sont identiques, la pertinence du modèle et la méthode d'analyse statistique utilisées dans le cadre des bases de données sollicitées, montrent une prévalidation de ce modèle.

Pour commencer une analyse des variables d'occupation du sol hors polyculture élevage est réalisée.

Tableau 4 Analyse de l'impact du pourcentage d'occupation sur la SAU de la vigne. Les variables surlignées en jaune ont été retenues après le calcul du plus petit AIC. Degrés de liberté : 1146, AIC = 5419, BIC = 5530,518, logLik = -2687,775. P.O. pour pourcentage d'occupation.

| Variabes | Estimate | Pr(> z) | significativité |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------------|
| Constante | 5.14E-02 | 9.76E-01 | |
| Teneur moyenne en COS en 2000 | 6.29E-01 | < 2.2e-16 | *** |
| MOAh sur culture en 2010 | 4.77E-01 | 8.63E-03 | ** |
| MOAh sur prairie en 2010 | 3.51E-03 | 9.00E-01 | |
| MOAg sur culture en 2010 | -1.11E+00 | 4.27E-04 | *** |
| MOAg sur prairie en 2010 | 1.47E-02 | 5.93E-01 | |

| | | | |
|--|-----------|----------|-----|
| P.O. des céréales en 2010 | -2.25E-03 | 7.59E-01 | |
| P.O. des oléagineux en 2010 | -1.99E-02 | 1.18E-01 | |
| P.O. des protéagineux en 2010 | 8.42E-03 | 9.07E-01 | |
| P.O. du maïs fourrage en 2010 | 3.10E-03 | 9.21E-01 | |
| P.O. des prairies temporaires en 2010 | 1.44E-02 | 1.49E-01 | |
| P.O. des prairies permanentes en 2010 | -2.31E-03 | 7.16E-01 | |
| P.O. de la vigne en 2010 | -1.95E-02 | 2.41E-03 | ** |
| Nombre de jours froids | 2.97E-01 | 1.27E-04 | *** |
| Nombre de jours chauds | -1.09E-01 | 8.73E-04 | *** |
| VIT en juillet | 3.07E+00 | 5.41E-03 | ** |
| Cumul annuel de précipitation | 2.02E-03 | 2.18E-02 | * |
| Spécificité pluviométrique du mois de Janvier | -3.91E-02 | 1.38E-03 | ** |
| VIP en juillet | -4.63E-02 | 6.56E-02 | . |
| Médiane de la teneur en argile | 7.89E-03 | 7.38E-10 | *** |
| Médiane de la teneur en limon | -1.73E-03 | 2.42E-02 | * |

Les bases de données du pourcentage d'occupation de la SAU des vignes, vergers, du maraîchage et de l'horticulture sont assez peu fournies. En effet, seulement 324 cantons possèdent ces quatre informations. Les lignes possédant des données manquantes sont bloquantes pour certaines analyses statistiques dans R (fonctions « vif » et StepAIC). Cependant, certaines de ces occupations du sol ont un impact sur les teneurs en COS (tableau 10 en annexe : Saby et al., 2014). Leur impact sur la teneur en COS est calculé pour “valider” la cohérence des traitements statistiques. Ces variables d'occupation sont ensuite écartées de l'analyse pour maximiser le nombre de cantons à intégrer dans le modèle. Une régression GLS a alors été réalisée pour chacune de ces quatre variables sur les cantons possédant ces informations.

Les résultats pour la vigne figurent dans le Tableau 4. La p-value du pourcentage d'occupation de la SAU en vigne montre une significativité statistique de l'ordre de 1,27E-4 et le modèle le plus parcimonieux retient cette variable, validant son importance. D'après les résultats de nos estimations, la surface en vigne a une relation négative avec la teneur en COS. Ce résultat est validé par le tableau 10 (Annexes).

La part des vergers dans la SAU n'est pas significative (résultats non présentés, 2258 observations) et n'a pas été retenue dans le modèle le plus parcimonieux. La moyenne de la teneur en COS des vergers étant plus proche de la moyenne des teneurs en COS des cultures que de celle des vignes (tableau 10 en annexe), le modèle n'a donc pas réussi à mesurer l'effet d'une variable moins impactant que l'occupation de la vigne sur la teneur en COS. L'étude du pourcentage d'occupation de la SAU du maraîchage a montré une influence négative faiblement significative, de l'ordre de 0,07% (résultats non présentés, 2365 observations) et est retenu par le modèle le plus parcimonieux. L'horticulture a montré un effet significatif positif (résultats non présentés, 539 observations) et a été retenu par le modèle le plus parcimonieux. Cependant la constante du modèle est très significative, indiquant qu'il manque des variables explicatives.

Tableau 5 : Influence des zones climatiques sur la teneur en COS. Le type de climat de montagne n'y figure pas car nous n'avons pas de données d'analyse de COS. Degrés de liberté : 2365, AIC = 1423,58 ; BIC = 14291,49 ; logLik = -7110,79

| Variabes | Estimate | Pr(> z) | Significativité |
|--|-----------------|--------------------|------------------------|
| Constante | 21.636 | < 2.2e-16 | *** |
| Climat semi-continentale et climat des marges montagnard | -4.261 | < 2.2e-16 | *** |
| Climat océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord | -7.862 | < 2.2e-16 | *** |
| Climat océanique altéré | -7.424 | < 2.2e-16 | *** |
| Climat océanique franc | -5.344 | < 2.2e-16 | *** |

| | | | |
|--------------------------------------|---------|-----------|-----|
| Climat mediterraneen altere | -9.994 | < 2.2e-16 | *** |
| Climat du Bassin du Sud-Ouest | -11.317 | < 2.2e-16 | *** |
| Climat mediterraneen | -11.708 | < 2.2e-16 | *** |

D'après nos résultats, la typologie du climat a un impact statistiquement significatif sur la teneur en COS (Tableau 5), conformément aux travaux de Paroissien et al. (à paraître). L'étude des types de sol montre aussi une difficulté pour les analyses, puisqu'un individu doit être représenté par une unité de sol homogène, et comme il peut y avoir plusieurs types de sol par canton, l'incorporation des types de sol dans la base de données engendre plusieurs lignes par cantons (plus un canton a de types de sols différents et plus ce canton sera représenté dans la base de données, tous les cantons ne sont donc plus équivalents). Les sols du type « Humo-Calcaric Lithosol », « Ochric Andosol », « Humic Cambisol » et « Humic Andosol » ont une influence positive significative sur la teneur en COS contrairement au « Gleyic Cambisol ». Cependant, la robustesse des résultats de la régression estimant l'impact des types de sol sur la teneur en COS peut être remis en cause puisque la régression est très dépendante de sa constante (grande significativité).

L'étude de l'influence des unités pédoclimatiques (voir la carte des UPC en annexes) sur la teneur en COS nous confronte à la même difficulté que pour les types de sol. Au total, 226 unités pédoclimatiques sur 257 ont montré une influence significative sur la teneur en COS du sol.

Effets de la matière organique animale

Analyse de la teneur en Carbone Organique du Sol en 2010

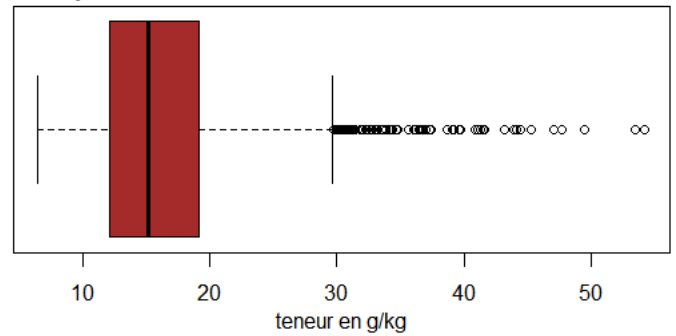
Pour commencer, une analyse du lien entre la teneur en Carbone organique des sols et les variables d'intérêt est réalisée pour expliquer les teneurs en 2010 (Tableau 5).

La régression 1, analyse les liens de la teneur en COS de 2010 sans la variable de la MOA granivore de 2010, cette dernière est corrélée avec les MOA granivore épanchée sur culture et sur prairie. Une seconde régression a donc été réalisée avec les MOA mais sans la destination des effluents (seules les variables montrant des différences avec la première régression ont été présentées). Les variables soulignées sont celles retenues par la minimisation de l'AIC pour l'étude de la SAMO régionale. Les variables soulignées sont celles retenues par la minimisation de l'AIC pour l'étude de la MOA. Degrés de liberté : 2365, AIC = 11403,53 ; BIC = 11518,9 ; logLik = -5681,765

Tableau 5 : Régression GLS de la teneur en COS de 2010 en fonction des variables pédoclimatiques et agricoles.

| | Premier décile 10.13 g/kg | | | Premier quartile 12.06 g/kg | | | Médiane 15.18 g/kg | | | Moyenne 16.34 g/kg | | | Dernier quartile 19.13 g/kg | | | Dernier décile 23.55 g/kg | | |
|--|------------------------------|---------------------|------------|--------------------------------|---------------------|------------|-----------------------|---------------------|------------|-----------------------|---------------------|------------|--------------------------------|---------------------|------------|------------------------------|---------------------|------------|
| | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | |
| Régressions 1 : | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Constante | -5.08E-02 | 9.41E-01 | | 1.80E-01 | 8.09E-01 | | 4.52E-01 | 6.10E-01 | | 5.65E-01 | 5.33E-01 | | 1.25E+00 | 2.99E-01 | | 1.57E+00 | 3.61E-01 | |
| Teneur moyenne en COS en 2000 | 5.62E-01 | < 2.2e-16 | *** | 6.28E-01 | < 2.2e-16 | *** | 6.63E-01 | < 2.2e-16 | *** | 6.55E-01 | < 2.2e-16 | *** | 6.77E-01 | < 2.2e-16 | *** | 5.49E-01 | < 2.2e-16 | *** |
| MOAh en 2010 | 4.43E-01 | 5.45E-02 | . | 2.26E-01 | 3.63E-01 | | 7.76E-02 | 7.93E-01 | | 1.61E-01 | 5.96E-01 | | -9.49E-02 | 8.13E-01 | | 8.14E-01 | 1.57E-01 | |
| MOAh sur culture en 2010 | -1.02E-03 | 8.84E-01 | | 1.58E-02 | 3.46E-02 | * | 2.74E-02 | 2.05E-03 | ** | 3.88E-02 | 2.08E-05 | *** | 3.98E-02 | 9.99E-04 | *** | 3.49E-02 | 4.38E-02 | * |
| MOAh sur prairie en 2010 | 6.58E-03 | 6.36E-01 | | 3.93E-03 | 7.93E-01 | | 3.55E-03 | 8.42E-01 | | -5.34E-03 | 7.70E-01 | | 5.65E-04 | 9.81E-01 | | -1.57E-02 | 6.51E-01 | |
| MOAg sur culture en 2010 | 1.22E-01 | 3.26E-01 | | -7.49E-02 | 5.75E-01 | | -8.37E-02 | 5.97E-01 | | -4.11E-02 | 8.00E-01 | | 6.01E-05 | 1.00E+00 | | 3.28E-01 | 2.82E-01 | |
| MOAg sur prairie en 2010 | 8.81E-05 | 9.53E-01 | | 2.29E-04 | 8.86E-01 | | 1.24E-04 | 9.48E-01 | | 3.15E-04 | 8.71E-01 | | 2.50E-04 | 9.23E-01 | | 3.73E-04 | 9.19E-01 | |
| P.O. des céréales en 2010 | 2.65E-03 | 4.59E-01 | | 1.48E-03 | 7.01E-01 | | -3.63E-03 | 4.28E-01 | | -5.34E-03 | 2.55E-01 | | -9.24E-03 | 1.38E-01 | | -1.37E-02 | 1.25E-01 | |
| P.O. des oléagineux en 2010 | -3.30E-04 | 9.61E-01 | | 5.75E-04 | 9.37E-01 | | 3.54E-03 | 6.83E-01 | | 2.16E-03 | 8.08E-01 | | 7.65E-03 | 5.16E-01 | | 1.18E-02 | 4.83E-01 | |
| P.O. des protéagineux en 2010 | -7.66E-03 | 7.74E-01 | | -2.60E-02 | 3.66E-01 | | -4.27E-02 | 2.12E-01 | | -6.22E-02 | 7.57E-02 | . | -8.79E-02 | 5.81E-02 | . | -1.48E-01 | 2.64E-02 | * |
| P.O. du maïs fourrage en 2010 | 8.84E-04 | 9.40E-01 | | 1.30E-02 | 3.06E-01 | | 9.76E-03 | 5.19E-01 | | 2.59E-02 | 9.52E-02 | . | 2.55E-02 | 2.16E-01 | | 4.44E-02 | 1.32E-01 | |
| P.O. des prairies temporaires en 2010 | 3.28E-02 | 2.81E-11 | *** | 2.96E-02 | 2.31E-08 | *** | 3.16E-02 | 5.76E-07 | *** | 2.55E-02 | 8.20E-05 | *** | 2.74E-02 | 1.40E-03 | ** | 1.92E-02 | 1.16E-01 | |
| P.O. prairies permanentes en 2010 | 9.69E-04 | 7.26E-01 | | 5.14E-04 | 8.63E-01 | | 8.57E-03 | 1.56E-02 | * | 1.15E-02 | 1.64E-03 | ** | 2.00E-02 | 3.57E-05 | *** | 3.40E-02 | 9.84E-07 | *** |
| Nombre de jours chauds | -2.29E-01 | < 2.2e-16 | *** | -2.39E-01 | < 2.2e-16 | *** | -2.51E-01 | < 2.2e-16 | *** | -2.43E-01 | < 2.2e-16 | *** | -2.65E-01 | 3.18E-15 | *** | -4.10E-01 | < 2.2e-16 | *** |
| VIT du mois de Juillet | 1.93E+00 | 7.91E-06 | *** | 2.07E+00 | 8.52E-06 | *** | 2.06E+00 | 1.95E-04 | *** | 2.27E+00 | 6.08E-05 | *** | 2.15E+00 | 4.15E-03 | ** | 3.64E+00 | 7.10E-04 | *** |
| VIP du mois de Janvier | 3.27E-02 | 4.82E-15 | *** | 3.30E-02 | 2.17E-13 | *** | 3.40E-02 | 2.47E-10 | *** | 2.79E-02 | 4.77E-07 | *** | 2.76E-02 | 1.66E-04 | *** | 4.45E-02 | 1.88E-05 | *** |
| VIP du mois de Juillet | -2.90E-02 | 3.29E-03 | ** | -2.58E-02 | 1.50E-02 | * | -1.42E-02 | 2.62E-01 | | -9.13E-03 | 4.80E-01 | | -2.73E-03 | 8.73E-01 | | 1.45E-02 | 5.54E-01 | |
| altitude | 1.63E-03 | 3.32E-06 | *** | 1.44E-03 | 1.29E-04 | *** | 5.48E-04 | 2.21E-01 | | 5.13E-04 | 2.63E-01 | | 2.81E-04 | 6.41E-01 | | 1.39E-03 | 1.04E-01 | |
| Médiane de la teneur en argile | 7.74E-03 | < 2.2e-16 | *** | 8.09E-03 | < 2.2e-16 | *** | 9.59E-03 | < 2.2e-16 | *** | 9.34E-03 | < 2.2e-16 | *** | 1.06E-02 | < 2.2e-16 | *** | 1.62E-02 | < 2.2e-16 | *** |
| Médiane de la teneur en limon | 4.18E-04 | 2.59E-01 | | -2.92E-04 | 4.64E-01 | | -7.59E-04 | 1.12E-01 | | -4.71E-04 | 3.35E-01 | | -1.03E-03 | 1.14E-01 | | -2.53E-03 | 6.61E-03 | ** |
| Régression 2 : | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MOAh en 2010 | 4.81E-01 | 3.56E-02 | * | 2.63E-01 | 2.87E-01 | | 1.11E-01 | 7.05E-01 | | 1.79E-01 | 5.54E-01 | | -6.56E-02 | 8.70E-01 | | 8.12E-01 | 1.56E-01 | |
| MOAg en 2010 | 4.08E-01 | 9.54E-03 | ** | 2.71E-01 | 1.10E-01 | | 2.32E-01 | 2.49E-01 | | 2.60E-01 | 2.07E-01 | | 3.11E-01 | 2.53E-01 | | 5.92E-01 | 1.26E-01 | |
| P.O. des céréales en 2010 | 1.93E-03 | 5.88E-01 | | 5.18E-04 | 8.93E-01 | | -4.62E-03 | 3.13E-01 | | -6.65E-03 | 1.57E-01 | | -1.05E-02 | 9.29E-02 | . | -1.54E-02 | 8.33E-02 | . |

Répartition des teneurs en COS de 2365 cantons



La très forte corrélation positive de la teneur en COS de 2000 avec la teneur en COS de 2010 et la non significativité de la constante tend à valider la régression. Les influences du nombre de jours chauds, de l'altitude et de la médiane de l'argile sont également corrélées positivement et significativement comme dans les travaux de Paroissien et al. (*à paraître*). On peut observer que

l'effet de l'altitude est assez ténu, mais dans les données utilisées, il y a assez peu d'analyses de sol faites en altitude (dernier décile à 508 m.). Des régressions ont aussi été réalisées avec le nombre de jours froids, montrant un impact positif très significatif de ce paramètre sur la teneur en COS (en adéquation avec les résultats de Paroissien et al., *à paraître*).

Au niveau des assolements, les résultats obtenus sont les suivants :

- Les céréales et les oléagineux ne montrent pas d'effet statistiquement significatif sur la teneur en COS. Cependant, les céréales ont été retenues dans le modèle le plus parcimonieux (établi *via* le critère d'information d'Akaike (AIC)), suggérant que les céréales ajoutent un pouvoir explicatif à la régression lorsqu'il s'agit d'expliquer la moyenne des teneurs en COS de 2010.
- Les protéagineux ont un impact négatif sur le COS pour les teneurs les plus élevées.
- Le maïs fourrage, les prairies temporaires et les prairies permanentes ont un impact positif sur la teneur en COS : les travaux Paroissien et al. (*à paraître*) donnent les mêmes résultats pour les surfaces fourragères prairiales et les surfaces toujours en herbe. D'ailleurs, ces cultures ont un impact à long terme sur le carbone organique des sols. Issanchou (2017) a aussi remarqué un effet positif des surfaces de maïs ensilage sur la teneur en COS (pour le troisième quartile) et aucun pour le maïs grain.

Les variables de la MOA granivore et herbivore montrent peu d'influence sur la teneur en COS. Cependant, lorsque l'on ajoute comme information, la destination des épandages, la MOA herbivore épandue sur les cultures montrent une très nette influence positive et ce pour quasiment tous les niveaux de teneurs en COS (quartiles, médiane, moyenne et dernier décile) contrairement à celle des granivores qui ne montre pas de lien. Les MOA épandues sur les prairies ne montrent aucune significativité.

Des régressions ont été réalisées en remplaçant la MOA épandue sur culture et prairie qui a calculée à partir des moyennes régionales avec celle qui a été calculée avec l'ajustement au canton. Les résultats ont montré un impact négatif de la MOA herbivore épandue sur culture ainsi que de la MOA granivore épandue sur prairie. Ces résultats sont en désaccord avec la littérature, que ce soit avec les connaissances agronomiques (La valeur agronomique des engrais de ferme) ou les analyses à grande échelle (Goidts and van Wesemael, 2007; Capriel, 2013).

Analyse de l'évolution de la teneur en Carbone Organique du Sol entre 2000 et 2010

Pour mettre en évidence l'impact de l'augmentation des variables d'intérêt sur le COS, une seconde régression est réalisée avec l'évolution de la teneur en carbone organique du sol entre 2000 et 2010 (Tableau 6).

La très forte corrélation négative sur l'évolution de la teneur en COS et la non significativité de la constante tend à valider la régression. De plus, les variables pédoclimatiques ont la même influence que dans le Tableau 5. Les régressions issues des cantons du prétraitement montrent très globalement les mêmes résultats, mais ont une constante toujours significative. L'effet antécédent du maïs et celui des prairies temporaires et permanentes (représentées par leur pourcentage d'occupation de la SAU en 2000) ont un effet positif sur l'évolution du COS et ont montré les mêmes effets que dans les travaux de Paroissien et al., *à paraître*. Les effets antécédents des MOAh et MOAg sur prairie et culture ne montrent pas d'effet sur la moyenne de l'évolution du COS, seul certains quartiles et médiane le sont.

L'évolution des surfaces en céréales a un impact positif pour les plus faibles augmentations de COS. L'évolution du maïs fourrage ne montre pas d'effet significatif sur l'évolution de la teneur en COS, correspondant aux résultats du Tableau 8. L'évolution de la prairie permanente montre peu d'effet.

Tableau 6 : Régression GLS de l'évolution de la teneur en COS en fonction des variables pédoclimatiques et agricoles. La première régression correspond à la régression réalisée sur tous les cantons, la deuxième utilise les mêmes variables mais est réalisée avec les cantons issus du prétraitement (seules les variables montrant des différences ont été présentées). Les variables fluorées sont celles retenues par la minimisation de l'AIC pour l'étude de la SAMO régionale. Les variables soulignées sont celles retenues par la minimisation de l'AIC pour l'étude de la MOA. Pour la régression avec tous les cantons : Degrés de liberté = 2365 ; AIC = 11371.59 ; BIC = 11550.41 ; LogLik = -5654.794. Pour la régression des cantons issus du prétraitement : Degrés de liberté = 1802 ; AIC 8155 ; BIC = 8326.19 ; LogLik = -4046.897. P.O. pour pourcentage d'occupation ; Evol.P.O. pour l'évolution du pourcentage d'occupation ; la MOA est en t de Matière Sèche/ha/an ; VIT pour la variabilité interannuelle de la température ; VIP pour la variabilité interannuelle de la pluie.

| | Premier décile | | | Premier quartile | | | Médiane | | | Moyenne | | | Dernier quartile | | | Dernier décile | | |
|--|------------------|---------------------|------------|------------------|---------------------|------------|------------------|---------------------|------------|------------------|---------------------|------------|------------------|---------------------|------------|------------------|---------------------|------------|
| | -2.72 g/kg | | | -0.97 g/kg | | | 0.32 g/kg | | | 0.098 g/kg | | | 1.34 g/kg | | | 2.79 g/kg | | |
| Régression 1 : | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | |
| Constante | -6.89E-01 | 3.35E-01 | | -4.29E-01 | 5.78E-01 | | -2.55E-01 | 7.81E-01 | | -2.93E-01 | 7.56E-01 | | 3.09E-01 | 8.05E-01 | | -3.36E-01 | 8.52E-01 | |
| Teneur moyenne en COS en 2000 | -4.54E-01 | < 2.2e-16 | *** | -3.79E-01 | < 2.2e-16 | *** | -3.32E-01 | < 2.2e-16 | *** | -3.48E-01 | < 2.2e-16 | *** | -3.19E-01 | < 2.2e-16 | *** | -4.66E-01 | < 2.2e-16 | *** |
| EvolMOherb | 9.81E-01 | 3.31E-02 | * | 8.48E-01 | 8.70E-02 | . | 5.08E-01 | 3.88E-01 | | 5.65E-01 | 3.51E-01 | | 1.80E-01 | 8.22E-01 | | 9.36E-01 | 4.17E-01 | |
| EvolMOgrani | 4.16E-01 | 3.83E-01 | | 5.41E-01 | 2.91E-01 | | 1.05E-02 | 9.86E-01 | | 5.78E-02 | 9.27E-01 | | -4.81E-01 | 5.64E-01 | | -1.39E+00 | 2.43E-01 | |
| MOAh sur culture en 2000 | -8.81E-04 | 9.62E-01 | | -2.12E-02 | 2.86E-01 | | -6.89E-02 | 3.40E-03 | ** | -2.26E-02 | 3.48E-01 | | -9.56E-02 | 2.65E-03 | ** | 8.30E-02 | 6.67E-02 | . |
| MOAh sur prairie en 2000 | -2.29E-02 | 5.35E-01 | | -3.80E-02 | 3.38E-01 | | -4.78E-02 | 3.10E-01 | | -6.15E-02 | 2.04E-01 | | -5.91E-02 | 3.57E-01 | | -9.60E-02 | 2.98E-01 | |
| MOAg sur culture en 2000 | -1.81E-01 | 2.96E-01 | | -3.93E-01 | 3.57E-02 | * | -4.32E-01 | 5.21E-02 | . | -2.88E-01 | 2.08E-01 | | -2.26E-01 | 4.54E-01 | | 3.05E-01 | 4.81E-01 | |
| MOAg sur prairie en 2000 | 8.08E-03 | 3.26E-01 | | 9.14E-03 | 3.03E-01 | | 1.19E-02 | 2.59E-01 | | 7.08E-03 | 5.14E-01 | | 8.54E-03 | 5.52E-01 | | -3.93E-03 | 8.49E-01 | |
| Evolution de la MOAh sur culture | -1.44E-04 | 9.84E-01 | | 2.10E-02 | 8.07E-03 | ** | 3.76E-02 | 6.76E-05 | *** | 4.56E-02 | 2.69E-06 | *** | 5.30E-02 | 3.68E-05 | *** | 2.41E-02 | 1.91E-01 | |
| Evolution de la MOAh sur prairie | -6.52E-03 | 6.60E-01 | | -6.55E-03 | 6.81E-01 | | -3.59E-03 | 8.50E-01 | | -1.01E-02 | 6.05E-01 | | -1.02E-03 | 9.69E-01 | | -1.06E-02 | 7.75E-01 | |
| Evolution de la MOAg sur culture | -6.13E-02 | 8.12E-01 | | -2.76E-01 | 3.20E-01 | | 3.41E-02 | 9.18E-01 | | -1.39E-02 | 9.67E-01 | | 3.42E-01 | 4.48E-01 | | 1.04E+00 | 1.08E-01 | |
| Evolution de la MOAg sur prairie | -1.43E-04 | 9.23E-01 | | 3.60E-05 | 9.82E-01 | | -4.84E-05 | 9.79E-01 | | 1.57E-04 | 9.35E-01 | | 1.51E-04 | 9.53E-01 | | 2.45E-04 | 9.47E-01 | |
| P.O. des céréales en 2000 | 8.89E-03 | 4.69E-02 | * | 8.49E-03 | 7.78E-02 | . | 4.89E-03 | 3.93E-01 | | 7.72E-03 | 1.90E-01 | | 6.02E-03 | 4.40E-01 | | 1.98E-02 | 7.64E-02 | . |
| P.O. des oléagineux en 2000 | -7.02E-04 | 9.24E-01 | | 2.63E-03 | 7.40E-01 | | 6.58E-03 | 4.84E-01 | | 4.23E-03 | 6.62E-01 | | 9.90E-03 | 4.39E-01 | | 1.04E-02 | 5.72E-01 | |
| P.O. des protéagineux en 2000 | 1.74E-02 | 5.40E-01 | | -3.52E-03 | 9.08E-01 | | -2.40E-02 | 5.08E-01 | | -4.11E-02 | 2.70E-01 | | -6.79E-02 | 1.69E-01 | | -1.37E-01 | 5.44E-02 | . |
| P.O. du maïs fourrage en 2000 | 3.97E-02 | 1.80E-03 | ** | 4.59E-02 | 8.15E-04 | *** | 4.07E-02 | 1.25E-02 | * | 6.57E-02 | 8.76E-05 | *** | 5.81E-02 | 8.96E-03 | ** | 1.24E-01 | 1.08E-04 | *** |
| P.O. prairies temporaires en 2000 | 4.97E-02 | < 2.2e-16 | *** | 4.29E-02 | 3.58E-13 | *** | 4.09E-02 | 5.27E-09 | *** | 3.74E-02 | 1.85E-07 | *** | 3.47E-02 | 2.64E-04 | *** | 4.76E-02 | 4.31E-04 | *** |
| P.O. prairies permanentes en 2000 | 1.12E-02 | 1.39E-03 | ** | 1.04E-02 | 5.87E-03 | ** | 1.83E-02 | 5.17E-05 | *** | 2.45E-02 | 1.47E-07 | *** | 3.32E-02 | 7.96E-08 | *** | 6.58E-02 | 1.69E-13 | *** |
| Evol.P.O. des céréales | 1.75E-02 | 6.77E-03 | ** | 1.94E-02 | 5.47E-03 | ** | 1.41E-02 | 8.89E-02 | . | 8.68E-03 | 3.09E-01 | | 6.37E-03 | 5.73E-01 | | -4.53E-03 | 7.81E-01 | |
| Evol.P.O. des oléagineux | -2.74E-03 | 7.56E-01 | | -2.85E-03 | 7.64E-01 | | 2.67E-04 | 9.81E-01 | | -2.12E-04 | 9.85E-01 | | 8.37E-03 | 5.86E-01 | | 8.64E-03 | 6.96E-01 | |
| Evol.P.O. des protéagineux | -2.27E-02 | 4.36E-01 | | -2.63E-02 | 4.02E-01 | | -2.72E-02 | 4.66E-01 | | -4.33E-02 | 2.60E-01 | | -5.20E-02 | 3.07E-01 | | -9.65E-02 | 1.87E-01 | |
| Evol.P.O. du maïs fourrage | -1.71E-02 | 3.70E-01 | | -1.23E-02 | 5.49E-01 | | -1.98E-02 | 4.16E-01 | | -1.63E-02 | 5.17E-01 | | -1.85E-02 | 5.79E-01 | | -2.15E-02 | 6.53E-01 | |
| Evol.P.O. prairies temporaires | -2.84E-02 | 6.72E-03 | ** | -3.14E-02 | 5.44E-03 | ** | -3.23E-02 | 1.62E-02 | * | -2.84E-02 | 3.99E-02 | * | -3.13E-02 | 8.70E-02 | . | -2.63E-02 | 3.17E-01 | |
| Evol.P.O. prairies permanentes | 1.32E-03 | 7.17E-01 | | -2.34E-03 | 5.50E-01 | | 3.18E-03 | 4.94E-01 | | 5.72E-03 | 2.32E-01 | | 9.38E-03 | 1.40E-01 | | 2.06E-02 | 2.42E-02 | * |

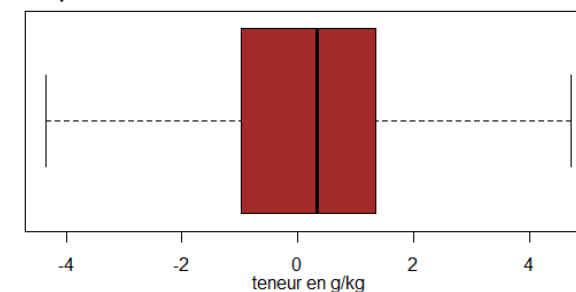
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----|
| Nombre de jours chauds | -2.09E-01 | < 2.2e-16 | *** | -2.14E-01 | < 2.2e-16 | *** | -2.19E-01 | < 2.2e-16 | *** | -2.06E-01 | 3.10E-15 | *** | -2.21E-01 | 1.42E-10 | *** | -3.39E-01 | 2.80E-12 | *** |
| VIT du mois de Juillet | 1.91E+00 | 1.04E-05 | *** | 1.97E+00 | 2.33E-05 | *** | 1.93E+00 | 4.91E-04 | *** | 2.15E+00 | 1.62E-04 | *** | 1.96E+00 | 9.70E-03 | ** | 3.60E+00 | 9.34E-04 | *** |
| VIP du mois de Janvier | 3.30E-02 | 1.81E-14 | *** | 3.35E-02 | 5.19E-13 | *** | 3.63E-02 | 5.53E-11 | *** | 3.04E-02 | 1.04E-07 | *** | 3.22E-02 | 2.10E-05 | *** | 5.16E-02 | 1.74E-06 | *** |
| VIP du mois de Juillet | -2.70E-02 | 5.30E-03 | ** | -2.61E-02 | 1.25E-02 | * | -1.69E-02 | 1.73E-01 | | -1.42E-02 | 2.65E-01 | | -1.16E-02 | 4.95E-01 | | 4.81E-04 | 9.84E-01 | |
| altitude | 1.60E-03 | 6.73E-06 | *** | 1.43E-03 | 1.65E-04 | *** | 5.79E-04 | 1.99E-01 | | 4.87E-04 | 2.93E-01 | | 3.08E-04 | 6.15E-01 | | 8.32E-04 | 3.40E-01 | |
| Médiane de la teneur en argile | 8.31E-03 | < 2.2e-16 | *** | 8.54E-03 | < 2.2e-16 | *** | 9.67E-03 | < 2.2e-16 | *** | 9.66E-03 | < 2.2e-16 | *** | 1.06E-02 | < 2.2e-16 | *** | 1.68E-02 | < 2.2e-16 | *** |
| Médiane de la teneur en limon | 5.64E-04 | 1.34E-01 | | -1.47E-04 | 7.16E-01 | | -6.29E-04 | 1.94E-01 | | -3.93E-04 | 4.29E-01 | | -9.57E-04 | 1.47E-01 | | -2.34E-03 | 1.33E-02 | * |
| Régression 2 : | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | |
| Evolution de la MOAg sur culture | -4.52E-02 | 7.96E-01 | | -2.99E-01 | 1.13E-01 | | -3.30E-01 | 1.94E-01 | | -5.08E-01 | 6.68E-02 | . | -6.45E-01 | 9.01E-02 | . | -1.24E+0 | 2.63E-02 | * |
| MOAh sur culture en 2000 | 3.10E-01 | 2.50E-03 | ** | 3.39E-01 | 2.17E-03 | ** | 1.24E-01 | 4.03E-01 | | 8.85E-02 | 5.86E-01 | | 1.24E-01 | 5.79E-01 | | -1.73E-01 | 5.98E-01 | |
| Médiane de la teneur en limon | -1.00E-05 | 9.74E-01 | | -4.81E-04 | 1.42E-01 | | -9.03E-04 | 4.16E-02 | * | -8.57E-04 | 7.66E-02 | . | -1.55E-03 | 2.01E-02 | * | -3.30E-03 | 7.19E-04 | *** |

Parmi les analyses des destinations des effluents d'élevage sur tous les cantons, seule la MOA herbivore épandue sur les cultures montre une influence positive. En revanche, l'analyse des cantons issus du prétraitement montre un effet négatif de la matière organique granivore épandue sur les grandes cultures.

Une régression identique au [Tableau 6](#) où la MOAh a été remplacée par la MOAh provenant du fumier et la MOAh provenant du lisier et où la MOAg a été remplacée par la MOA provenant du lisier des porcs, du lisier de volailles et du fumier de volailles. Lorsqu'elle est appliquée sur l'ensemble des cantons, seule la MOAh provenant du fumier à un effet positif (sur presque toutes les gammes d'évolution, sauf le troisième quartile) et la MOAh provenant du lisier a un effet négatif sur le dernier décile (tableau 11, annexes). Lorsque la régression est appliquée sur les cantons issus du prétraitement, les significativités pour la MOAh issue du fumier est légèrement moins importante (pas d'effet sur la moyenne et le dernier quartile), pour la MOAh issue du lisier est plus importante (significativité négative sauf pour la moyenne). De plus, le fumier et lisier provenant des volailles ont respectivement un effet significatif positif et négatif au dernier décile. Le lisier des porcs ne montre pas effet significatif.

Notre première hypothèse de départ précisant que nos résultats montrent des influences identiques avec les travaux analysant à grande échelle des variables de contrôle et une partie des variables d'occupation de la SAU (maïs, prairie temporaire et permanente, vigne et vergers) sur la teneur et l'évolution du COS est validée.

Répartition de l'évolution des teneurs en COS de 2365 cantons



Impacts des rotations

Les rotations courtes sont majoritairement composées de céréales et de maïs pour les régions d'élevage. Les rotations longues comprennent autant de groupes de culture mais en proportions plus équilibrées. Les rotations longues sont essentiellement composées de prairies, de céréales et de maïs.

Les 78 cantons n'ont pas montré d'écart à la moyenne avec les cantons de toute la France pour les pourcentages de céréales, d'oléagineux, de protéagineux et de surface toujours en herbe contrairement au maïs fourrage et aux prairies temporaires. Le résultat est identique si l'on prend tous les cantons des zones d'élevage (Rouquette et Pflimlin, 1995). Cependant la comparaison des boxplots (Figure 6 en annexes) entre l'échantillon et la population pour le maïs fourrage et la prairie temporaire montre une même dispersion des valeurs. On peut alors considérer que la représentativité des cantons sélectionnés reste correcte.

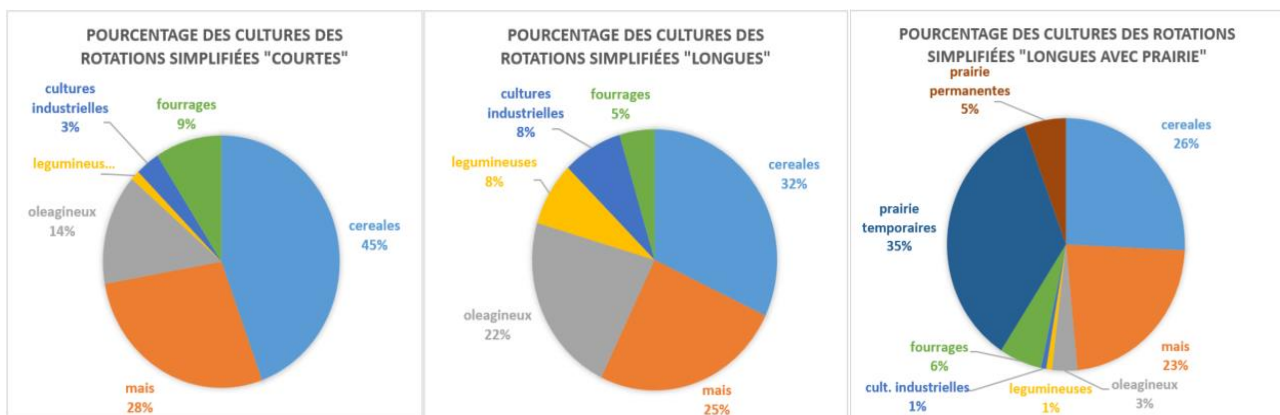
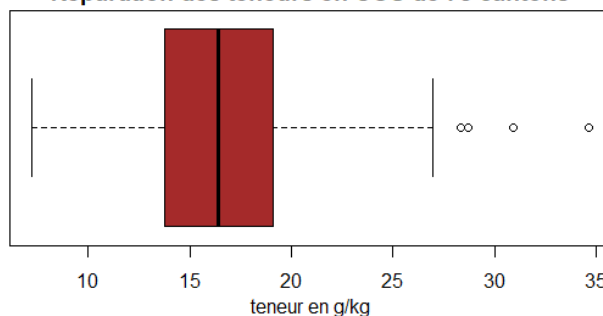


Figure 2 : Diagrammes en camembert de la fréquence des cultures par rapport aux cultures simplifiées. Les répétitions d'une même culture au sein de la rotation ne sont pas comprises dans le calcul.

Tableau 7 : Régression GLS de la teneur en COS de 2010 en fonction des variables pédoclimatiques et agricoles avec 78 cantons. Les régressions 1 et 2 sont composées des mêmes variables à l'exception des types de rotations simplifiées. Les variables fluorées sont celles retenues par la régression 1, et les variables soulignées sont celles retenues par la régression 2. Pour les deux régressions : degrés de liberté = 78; AIC = 304.1556 ; BIC = 358.36 ; LogLik = -129.0778. P.O. pour pourcentage d'occupation ; Evol.P.O. pour l'évolution du pourcentage d'occupation ; la MOA est en t de Matière Sèche/ha/an ; VIT pour la variabilité interannuelle de la température ; VIP pour la variabilité interannuelle de la pluie.

| | Premier décile 11.25 g/kg | | | Premier quartile 13.72 g/kg | | | Médiane 16.36 g/kg | | | Moyenne 16.76 g/kg | | | Dernier quartile 19.02 g/kg | | | Dernier décile 22.175 g/kg | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-------------------|------------|--------------------------------|-------------------|------------|-----------------------|---------------------|------------|-----------------------|---------------------|------------|--------------------------------|---------------------|------------|-------------------------------|-----------------|------------|
| | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | |
| Régression 1 : | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Constante | -1.88E+00 | 5.36E-01 | | -2.39E+00 | 4.64E-01 | | -1.36E+00 | 6.73E-01 | | -2.77E-01 | 9.45E-01 | | -1.63E+00 | 7.04E-01 | | 5.43E+00 | 4.54E-01 | |
| Teneur moyenne en COS en 2000 | 6.85E-01 | < 2e-16 | *** | 7.20E-01 | < 2e-16 | *** | 7.37E-01 | < 2.2e-16 | *** | 6.36E-01 | < 2.2e-16 | *** | 7.05E-01 | < 2.2e-16 | *** | 6.53E-01 | 8.78E-16 | *** |
| MOAh sur culture en 2010 | 3.27E-01 | 4.73E-01 | | 9.49E-02 | 8.46E-01 | | -5.31E-01 | 2.66E-01 | | -2.75E-01 | 6.44E-01 | | -1.47E+00 | 1.99E-02 | * | 9.91E-02 | 9.28E-01 | |
| MOAg sur culture en 2010 | -1.33E+00 | 3.81E-02 | * | -1.17E+00 | 9.08E-02 | . | -1.20E+00 | 7.94E-02 | . | -1.53E+00 | 7.53E-02 | . | -1.40E+00 | 1.30E-01 | | -2.48E+00 | 1.23E-01 | |
| P.O. des céréales en 2010 | 6.90E-03 | 7.71E-01 | | -5.00E-03 | 8.44E-01 | | -3.45E-02 | 1.67E-01 | | -3.43E-02 | 2.68E-01 | | -3.55E-02 | 2.90E-01 | | -1.26E-02 | 8.27E-01 | |
| P.O. des oléagineux en 2010 | 6.91E-03 | 8.76E-01 | | 3.37E-02 | 4.77E-01 | | 1.25E-02 | 7.87E-01 | | 2.62E-02 | 6.47E-01 | | -1.34E-02 | 8.27E-01 | | -7.53E-02 | 4.73E-01 | |
| P.O. des protéagineux en 2010 | 2.50E-02 | 9.20E-01 | | 1.22E-02 | 9.64E-01 | | 1.87E-01 | 4.76E-01 | | 5.93E-02 | 8.55E-01 | | 1.58E-02 | 9.64E-01 | | 3.75E-01 | 5.29E-01 | |
| P.O. du maïs fourrage en 2010 | 4.21E-02 | 3.33E-01 | | 3.63E-02 | 4.31E-01 | | 3.81E-03 | 9.33E-01 | | 3.63E-02 | 5.12E-01 | | -5.30E-02 | 3.73E-01 | | -1.04E-01 | 3.10E-01 | |
| P.O. prairies temporaires en 2010 | 4.35E-02 | 7.81E-02 | . | 3.46E-02 | 1.88E-01 | | 3.06E-02 | 2.30E-01 | | 3.42E-02 | 2.76E-01 | | 1.84E-02 | 5.85E-01 | | 3.70E-02 | 5.21E-01 | |
| Rotation « longue prairie » (%) | -8.38E-03 | 5.56E-01 | | -9.51E-03 | 5.26E-01 | | -1.45E-02 | 3.24E-01 | | -4.74E-03 | 7.94E-01 | | -1.74E-02 | 3.68E-01 | | 7.37E-03 | 8.21E-01 | |
| Rotation « longue » (%) | -2.50E-02 | 2.81E-01 | | -2.78E-02 | 2.64E-01 | | -4.40E-02 | 6.90E-02 | . | -2.19E-02 | 4.66E-01 | | -6.29E-02 | 4.99E-02 | * | -6.60E-02 | 2.31E-01 | |
| Evol.P.O. des oléagineux | -2.98E-02 | 7.81E-01 | | -1.21E-02 | 9.16E-01 | | -4.02E-02 | 7.20E-01 | | -1.15E-01 | 4.10E-01 | | -7.78E-02 | 6.01E-01 | | -6.80E-02 | 7.90E-01 | |
| Evol.P.O. des protéagineux | -1.64E-01 | 4.63E-01 | | -1.30E-01 | 5.86E-01 | | -1.57E-01 | 4.99E-01 | | -3.19E-01 | 2.70E-01 | | -2.53E-02 | 9.34E-01 | | 3.57E-03 | 9.95E-01 | |
| Evol.P.O. du maïs fourrage | 7.46E-02 | 6.49E-01 | | 8.60E-02 | 6.30E-01 | | 2.49E-01 | 1.52E-01 | | 4.32E-01 | 4.36E-02 | * | 8.36E-01 | 2.43E-04 | *** | 1.33E+00 | 5.43E-04 | *** |
| Evol.P.O. des prairies temporaires | 8.99E-03 | 8.98E-01 | | 7.06E-02 | 3.49E-01 | | 6.58E-02 | 3.76E-01 | | 1.55E-01 | 9.17E-02 | . | 1.88E-01 | 5.64E-02 | . | 2.23E-01 | 1.93E-01 | |
| Evol.P.O. prairies permanentes | 1.68E-01 | 8.35E-02 | . | 2.17E-01 | 3.75E-02 | * | 2.65E-01 | 9.72E-03 | ** | 3.55E-01 | 4.77E-03 | ** | 3.41E-01 | 1.21E-02 | * | 5.35E-01 | 2.05E-02 | * |
| Nombre de jours chauds | -2.73E-01 | 4.22E-02 | * | -3.81E-01 | 7.51E-03 | ** | -5.17E-01 | 1.80E-04 | *** | -6.05E-01 | 3.46E-04 | *** | -6.43E-01 | 4.02E-04 | *** | -9.30E-01 | 2.20E-03 | ** |
| VIT du mois de Juillet | 3.68E+00 | 8.48E-02 | . | 4.87E+00 | 3.34E-02 | * | 5.69E+00 | 1.09E-02 | * | 4.59E+00 | 9.74E-02 | . | 6.08E+00 | 4.00E-02 | * | 3.64E+00 | 4.73E-01 | |
| VIP du mois de Janvier | 1.51E-02 | 5.59E-01 | | 2.88E-02 | 2.99E-01 | | 2.79E-02 | 3.02E-01 | | 5.52E-02 | 9.50E-02 | . | 7.33E-02 | 3.97E-02 | * | 7.86E-02 | 1.99E-01 | |
| VIP du mois de Juillet | 1.94E-02 | 7.68E-01 | | -2.10E-03 | 9.76E-01 | | 2.05E-02 | 7.65E-01 | | -1.31E-02 | 8.78E-01 | | 8.54E-02 | 3.47E-01 | | -6.12E-02 | 6.95E-01 | |
| altitude | -3.15E-04 | 8.53E-01 | | -6.14E-05 | 9.73E-01 | | 1.54E-04 | 9.32E-01 | | 2.61E-03 | 2.35E-01 | | -1.11E-03 | 6.52E-01 | | 5.13E-03 | 2.09E-01 | |
| Médiane de la teneur en argile | 9.93E-04 | 8.15E-01 | | 2.69E-03 | 5.57E-01 | | 5.77E-03 | 1.90E-01 | | 1.05E-02 | 4.62E-02 | * | 6.27E-03 | 2.82E-01 | | 1.46E-02 | 1.30E-01 | |
| Régression 2 : | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rotation « longue » (%) | -4.96E-04 | 4.43E-01 | | -3.26E-04 | 6.35E-01 | | -2.89E-04 | 6.84E-01 | | 1.67E-04 | 8.51E-01 | | 4.82E-05 | 9.58E-01 | | -8.23E-04 | 5.88E-01 | |
| Rotation « courte » (%) | -1.22E-04 | 6.18E-01 | | -1.53E-04 | 5.58E-01 | | -1.65E-04 | 5.42E-01 | | -3.15E-04 | 3.54E-01 | | 7.87E-05 | 8.22E-01 | | -5.68E-04 | 3.26E-01 | |

Répartition des teneurs en COS de 78 cantons



Dans la régression la plus parcimonieuse (pour l’analyse de la médiane du COS), toutes les variables furent significatives hormis la constante (Régression 1 du tableau 9). En revanche cette régression ne retient pas les rotations longues lorsqu’on étudie la moyenne du COS. La taille de l’échantillon en est probablement la cause.

On peut observer que les rotations longues semblent avoir un effet négatif sur les plus grandes teneurs de COS (le dernier décile n’est pas touché car il y a très peu de canton). Les résultats de la partie précédente nous ont montré que les cultures qui composent cette rotation ont soit des impacts négatifs ou bien n’ont pas d’effets sur les teneurs en COS du troisième quartile. Ainsi ce type de rotation n’apporte plus suffisamment de carbone organique au sol pour entretenir sa teneur.

Les variables rotation courte et rotation longue avec prairie montrent une corrélation entre elles, de sorte que la combinaison de ces deux variables dans une même régression n’a pas pu se faire. L’analyse combinée de la rotation courte et longue n’a pas montré de significativité, peut-être parce que les deux rotations ont un impact similaire sur la teneur en COS.

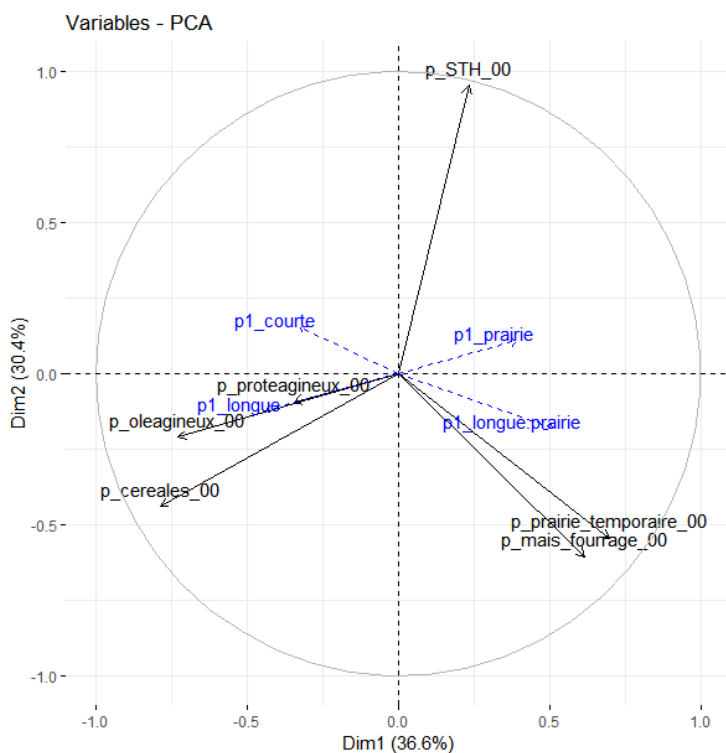


Figure 3 : ACP du pourcentage des assolements auquel on a projeté les types de rotations. Réalisée avec les 78 cantons. L’ACP est réalisée avec 5 axes, le pourcentage explicatif est de l’ordre de 100%. P1_courte : pourcentage de rotation courte. P1_longue : pourcentage de rotation longue ; p1_longue.prairie : pourcentage de rotation longue avec prairie ; p1_prairie : pourcentage des prairies permanentes. Les variables en noir indiquent le pourcentage que prend chaque type d’assolement sur la SAU totale en 2000.

La Figure 3, nous montre que les rotations « longues avec prairie » sont très bien corrélées (résultat plus visible sur l’ACP ne comprenant pas la prairie permanente) au pourcentage des prairies temporaires du RA, de même pour les rotations « longues » avec le pourcentage des protéagineux. En revanche les rotations « prairie » sont assez éloignées du pourcentage de la STH du RA.

L’extrapolation des rotations sur l’ensemble des cantons de France a fonctionné pour les deux méthodes mais la fiabilité de l’extrapolation est faible.

Discussion

Analyse des variables à l'échelle métropolitaine

L'impact des céréales montre un impact négatif (pour la moyenne de la teneur en COS), plusieurs raisons peuvent en être à l'origine. En effet, les céréales sont prédominantes dans les régions de grandes cultures qui ont des teneurs plus faibles en COS que les autres types de région (Paroissien et al., *à paraître*) ainsi que dans les types de rotations courtes (Figure 2) qui généralement, donnent des teneurs en COS plus faibles que les rotations plus longues (West et Post, 2002) ou qui ont des têtes de rotation pluriannuelles (Yang et Kay, 2001). De plus, un effet possiblement indirect peut y contribuer, puisque l'importance des céréales marque une certaine intensification de l'agriculture. Ces remarques vont dans le sens des analyses de l'évolution de la teneur en COS : on observe que l'évolution des surfaces en céréales a un impact positif pour les plus faibles augmentations de COS. L'absence d'effet positif pour les augmentations les plus élevées, est certainement le fait de l'exportation des pailles (même dans les zones de grande culture), limitant ainsi la restitution de carbone au sol. D'autres travaux ont aussi remarqué l'effet positif de l'évolution des céréales (Issanchou et al., 2017).

L'impact négatif des protéagineux sur la teneur en COS peut s'expliquer par une exportation totale des parties aériennes pour nourrir le bétail, une plus faible production de biomasse (les légumineuses/Fabacées font moins de biomasse que les Graminées/Poacées) et une augmentation du pool labile de carbone dans le sol (Blair et Crocker, 2000) rapidement minéralisable. En revanche, aucun impact de son évolution n'a été mis en évidence.

Le maïs fourrage, les prairies temporaires et les prairies permanentes montrent un impact positif sur la teneur en COS, résultats concordant avec les analyses à grande échelle sur le territoire français. Cependant, malgré les travaux déjà réalisés à partir de la BDAT (Issanchou, 2017 ; Paroissien et al., *à paraître*), les autres travaux (Loveland et Webb, 2003) indiquent un effet négatif du maïs sur la teneur en COS. Il est possible que lors du retournement des prairies, le maïs les remplace certainement (Hirschler et al., *à paraître*), correspondant à une intensification de l'élevage. Ainsi, les analyses de sols réalisées dans les champs de maïs (souvent en rotation avec des prairies et quelques fois des céréales suivant les régions) montrent des teneurs en COS élevées, puisqu'elles bénéficient des fortes teneurs du au précédent prairial (sous représenté dans les analyses). De ce fait, le maïs peut être corrélé à des teneurs plus élevées en COS que les autres cultures. De plus, l'effet mesuré est certainement marqué d'un biais provenant de la MOA herbivore préférentiellement attribuée au maïs par rapport aux autres cultures.

On peut appuyer cette hypothèse à l'aide d'une régression de l'évolution du maïs fourrager (où l'évolution du maïs fourrager est la variables expliquée et les variables agricoles et pédoclimatiques sont les variables explicatives) (Tableau 8). On peut observer que l'évolution de la MOA herbivore épandue montre un fort lien avec l'évolution du maïs fourrage mais pas celle qui est épandue sur les cultures. La même régression que pour le tableau 6 a été réalisée en remplaçant l'évolution du maïs fourrage par l'évolution des céréales, des oléagineux, des protéagineux et des prairies temporaires.

| | Estimate | Pr(> z) | |
|---------------------------------------|------------------|---------------------|------------|
| Constante | -6.02E-01 | 4.46E-01 | |
| p_maïs_fourrage_00 | -4.74E-02 | 5.67E-04 | *** |
| Evolution de la teneur moyenne en COS | -7.00E-03 | 6.54E-01 | |
| Evolution de la MOAh | 1.79E+00 | 6.69E-04 | *** |
| Evolution de la MOAh sur culture | -3.86E-04 | 9.63E-01 | |
| Evolution de la MOAh sur prairie | -4.92E-03 | 7.68E-01 | |
| Evolution de la MOAg sur culture | -4.80E-01 | 8.18E-03 | ** |
| Evolution de la MOAg sur prairie | -6.31E-04 | 7.08E-01 | |
| P.O. des céréales en 2010 | 3.71E-02 | < 2.2e-16 | *** |
| P.O. des oléagineux en 2010 | -7.12E-03 | 3.49E-01 | |
| P.O. des protéagineux en 2010 | 5.35E-02 | 7.58E-02 | . |
| P.O. prairies temporaires en 2010 | 5.39E-02 | < 2.2e-16 | *** |
| P.O. prairies permanentes en 2010 | 3.52E-02 | < 2.2e-16 | *** |
| Nombre de jours chauds | 4.50E-04 | 9.82E-01 | |
| VIT du mois de Juillet | -9.61E-01 | 4.85E-02 | * |
| VIP du mois de Janvier | 2.65E-03 | 5.61E-01 | |
| VIP du mois de Juillet | -3.34E-02 | 1.86E-03 | ** |
| altitude | -1.18E-03 | 1.89E-03 | ** |
| Médiane de la teneur en argile | 6.87E-04 | 3.54E-01 | |
| Médiane de la teneur en limon | 1.08E-03 | 1.03E-02 | * |

Tableau 8: Régression GLS de l'évolution de la proportion de maïs fourrager. Degrés de liberté = 2365 ; AIC = 10727.19 ; BIC = 10848.33 ; LogLik = -5342.594

Toutes ont un lien important avec le pourcentage d'occupation de la SAU de l'année 2000 (un peu moins fort pour les céréales et oléagineux qui en ont une p-value entre 5% et 0,01%) et une constante non significative, sauf pour les céréales et oléagineux (il faudrait certainement y ajouter le prix du marché). Seule les céréales et prairies temporaires ont un lien positif avec la MOA herbivore et aucune avec la SAMO épandue sur culture. Pour répondre à cette hypothèse il est nécessaire de calculer la MOA épandue sur les maïs (donnée disponible dans la PMPOA) tout en supprimant l'effet des prairies permanentes de 2000, généralement remplacées par le maïs lorsque les exploitations s'intensifient.

Les résultats de la régression (tableau 8) vont dans le sens de la régression du tableau 5 puisque l'évolution du pourcentage du maïs fourrage (qui fait aussi partie des SF) suit de manière positive celle des prairies temporaires. L'évolution de la STH quant à elle diminue lorsque les prairies permanentes augmentent (Tableau 8). L'évolution des prairies temporaires s'accompagne certainement d'une diminution des prairies permanentes lorsqu'un élevage tend à s'intensifier ou à s'orienter vers un système plus céréalier.

| | Estimate | Pr(> z) | |
|-----------------------------------|------------------|-----------------|------------|
| Constante | 2.22E+00 | 1.05E-01 | |
| Teneur moyenne en COS en 2000 | -4.65E-02 | 1.73E-02 | * |
| Evolution de la MOAh sur culture | -8.79E-03 | 5.40E-01 | |
| Evolution de la MOAh sur prairie | 6.21E-02 | 2.67E-02 | * |
| Evolution de la MOAg sur culture | -2.01E-01 | 5.25E-01 | |
| Evolution de la MOAg sur prairie | -2.34E-04 | 9.36E-01 | |
| P.O. des céréales en 2010 | 3.03E-02 | 4.83E-04 | *** |
| P.O. des oléagineux en 2010 | -8.18E-03 | 5.71E-01 | |
| P.O. des protéagineux en 2010 | -1.37E-02 | 8.08E-01 | |
| P.O. du maïs fourrage en 2010 | 1.27E-01 | 5.55E-08 | *** |
| P.O. prairies temporaires en 2010 | -4.42E-02 | 8.09E-06 | *** |
| P.O. prairies permanentes en 2010 | 3.80E-02 | 2.74E-08 | *** |
| Evol.P.O. des céréales | 6.79E-02 | 3.59E-06 | *** |
| Evol.E.P.O. des oléagineux | 1.01E-02 | 5.61E-01 | |
| Evol.P.O. des protéagineux | 3.94E-02 | 3.91E-01 | |

| | | | |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----|
| Evol.P.O. du maïs fourrage | 3.74E-01 | < 2.2e-16 | *** |
| Evol.P.O prairies temporaires | -3.42E-02 | 2.19E-05 | *** |
| Nombre de jours chauds | 1.97E-01 | 5.66E-07 | *** |
| VIT du mois de Juillet | -2.08E+00 | 1.31E-02 | * |
| VIP du mois de Janvier | -9.28E-03 | 2.69E-01 | |
| VIP du mois de Juillet | 1.31E-02 | 4.94E-01 | |
| altitude | 1.58E-04 | 8.21E-01 | |
| Médiane de la teneur en argile | -7.96E-04 | 5.70E-01 | |
| Médiane de la teneur en limon | -1.72E-03 | 2.13E-02 | * |

Tableau 9 : Régression GLS de l'évolution du pourcentage d'occupation de la prairie temporaire. Degrés de liberté = 2365 ; AIC = 13333.19 ; BIC = 13477.4 ; LogLik = -6641.595. P.O. pour pourcentage d'occupation ; Evol.P.O. pour l'évolution du pourcentage d'occupation ; la MOA est en t de Matière Sèche/ha/an ; VIT pour la variabilité interannuelle de la température ; VIP pour la variabilité interannuelle de la pluie.

On peut observer que l'évolution du pourcentage de SAU en prairie temporaire a un impact négatif sur l'évolution en COS (Tableau 9). Ce résultat peut paraître étonnant au vu des résultats de son occupation en 2010 et de son lien avec la teneur en COS de 2010 (Accoe F. et al., 2002) . Le projet RedSpyce de l'institut de l'élevage (Hirschler, à paraître) a montré que le rapport entre les surfaces toujours en herbe (STH) et les surfaces fourragères (SF) décroît dans les systèmes d'élevage suivant cet ordre : élevage, polyculture-élevage et systèmes de grandes cultures. De plus, il y a une tendance générale d'évolution des exploitations des élevages spécialisés vers la polyculture puis vers les grandes cultures. Ainsi l'évolution positive des prairies temporaires (faisant parti des SF) s'accompagne très certainement d'une diminution des prairies permanentes à l'échelle globale.

L'évolution de la prairie permanente montre peu d'effet. Pourtant, d'après la littérature, son impact est très positif sur le COS (Loveland et Webb, 2003), mais l'établissement d'une prairie augmente plus lentement le COS par rapport à la diminution de celle-ci lors de son retournement (Soussana et al, 2004). De plus, seuls 20% des cantons montrent des augmentations surfaciques en prairie permanente, ce qui peut minimiser son impact dans cette analyse et les sols prairiaux sont sous représentés dans la BDAT.

Concernant l'épandage des MOA, les résultats nous ont montré une absence d'effet de l'épandage des MOA sur les prairies, plusieurs causes peuvent en être à l'origine :

- L'effet du pâturage :
 - o Les prairies reçoivent pour la grande majorité de la MOA lorsque les cheptels pâturent (cas des herbivores) (Mcsherry et Ritchie, 2013).
 - o Les effets du pâturage sont multiples (Milchunas et Lauenroth, 1993 ; Derner et Schuman, 2007) et selon les caractéristiques environnementales, le pâturage peut augmenter la teneur en COS (Reeder et Shuman, 2002), ne faire aucun effet (Nosetto et al. 2006) ou la diminuer (Yong-Zhong et al. 2005). Cet effet est dépendant de nombreux facteurs (Mcsherry et Ritchie, 2013) tels que le type de sol, les précipitations, le type de photosynthèse, l'intensité du pâturage (Herfurth, D. (2015), la durée de l'étude ainsi que la profondeur du prélèvement : nous ne possédons pas toutes ces données à grande échelle qui peuvent donc gommer ou moduler les effets de la MAO épandue. L'impact des herbivores sur les MOS est largement dépendant des conditions du milieu, ce qui implique que la gestion des herbivores pourrait se faire de manière différente dans différentes régions (McSherry et Richie, 2013) et impacter les interactions sol-plantes (Bardgett et Wardle, 2003).

- Les sols de prairies ont des teneurs en COS beaucoup plus élevées que celles des cultures (Tableau 10, Saby et al., 2014) : une même quantité apportée augmente moins la teneur en COS dans les sols prairiaux que dans les sols où sont implantés des cultures.
- Les données de la BDAT représentent très mal les sols prairiaux (Schvartz et al., 1997), les échantillons des sols prairiaux influent alors faiblement sur les teneurs moyennes en COS utilisées dans cette étude.

Parmi les analyses des destinations des effluents d'élevage sur tous les cantons, seule la MOA herbivore épandue sur les cultures montre une influence positive pour les teneurs de COS en 2010 et son évolution. Ce résultat correspond à ceux du Tableau 6, à la littérature (Arrouays et al., 2002 ; Houot, 2005 ; Fliessbach et al., 2007) ainsi qu'aux analyses à des échelles régionales (Lettenens et al., 2005; Goidts and van Wesemael, 2007; Capriel, 2013). En revanche, pour l'évolution de la teneur en COS, l'analyse des cantons issus du prétraitement montre un effet négatif de la matière organique granivore épandue sur les grandes cultures. Cet impact est possiblement lié à la nature des effluents : 30% de la MOAg est sous forme de lisier et 93% de la MOAh sous forme de fumier en 2000 et 2010).

L'effet du lisier épandu sur les grandes cultures a notamment un impact négatif sur la teneur en COS et un impact positif sur le COS quand il est épandu sur les prairies (Bodet J., 2001). Cet effet négatif a aussi été mis en évidence au niveau régionale en Bavière (Capriel et al., 2013).

Notre seconde hypothèse, telle que nos analyses montrent un lien identique avec les travaux analysant à de faibles échelles (parcellaires) entre les variables d'occupation du sol et les variables de MOA avec la teneur ou l'évolution du COS est vérifiée.

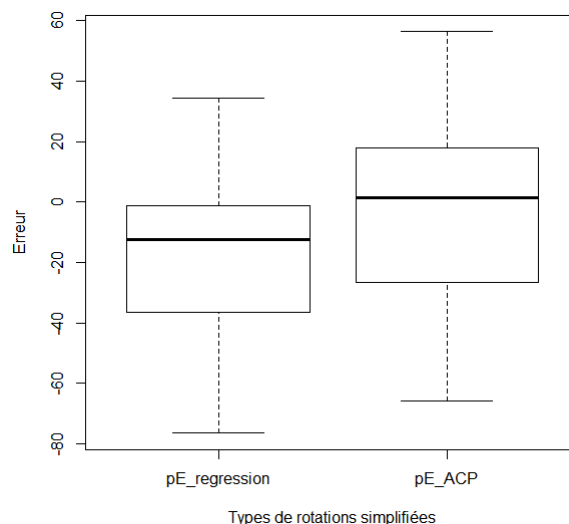
Analyse de l'influence des rotations

Théoriquement, la rotation la moins propice à la conservation du COS est la rotation courte et la plus propice, la rotation longue avec prairie (Yang et Kay, 2001 ; West et Post, 2002). Cependant l'échantillon utilisé est assez petit, et ne montre pas forcément la même significativité des variables étudiées selon l'ensemble des variables intégrées : la rotation longue n'a pas d'effet lorsqu'on ajoute la rotation courte à la place de la rotation longue avec prairie.

Pour mettre en évidence plus clairement les effets des rotations sur le COS et diminuer l'effet de l'échantillonnage, il est nécessaire d'augmenter le nombre de cantons à analyser.

Les rotations « prairie » sont assez éloignées du pourcentage de la STH du RA. Il est possible que les prairies soient sous-estimées dans les déclarations PAC, expliquant cette différence. La Figure 3 tend à appuyer cette hypothèse où le boxplot du pourcentage d'erreur (issu de la soustraction du pourcentage dans le RA par le pourcentage approximé) par la méthode des régressions, montre une sous-estimation pour les trois quarts des données.

Figure 4 : Boxplot des pourcentages d'erreur entre le pourcentage de prairie dans le RA et dans les calculs d'approximation des rotations (pE_regression avec l'approximation par les régressions et pE_ACP avec l'approximation par l'ACP).



L'étendue importante du pourcentage d'erreur obtenue à partir de l'ACP est certainement le fait de la mauvaise représentation de tous les cantons français. En effet sur l'axe explicatif des rotations prairiales de l'ACP, les 78 cantons s'étendent jusqu'à 3,21 contre 4,36 avec tous les cantons. L'approximation des rotations prairiales est très différente de la STH du RA. Les médianes sont proches de 0, cependant l'étendue de l'erreur n'est pas négligeable (Figure 5 et Figure 6).

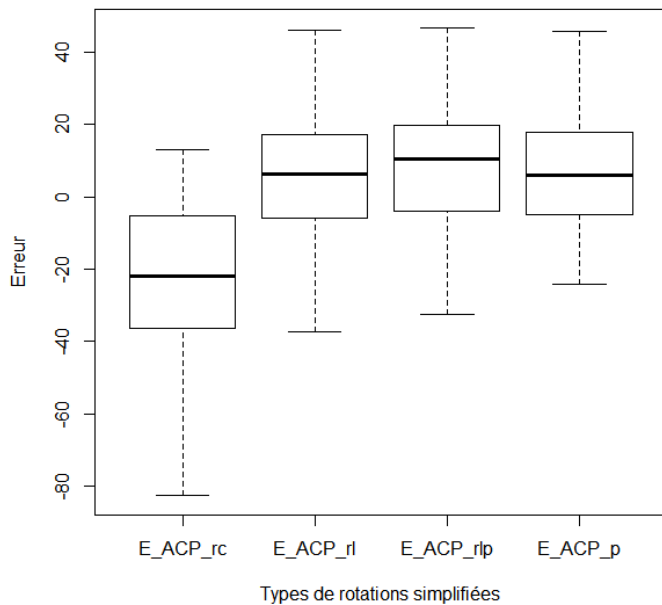


Figure 5 : Boxplot des pourcentages d'erreur entre le pourcentage des rotations mesurées et approximées avec l'ACP des 78 cantons. E_ACP_rc pour l'erreur d'approximation des rotations courtes, rl pour rotation longues, rlp pour rotation longues avec prairie et p pour rotation uniquement prairiale.

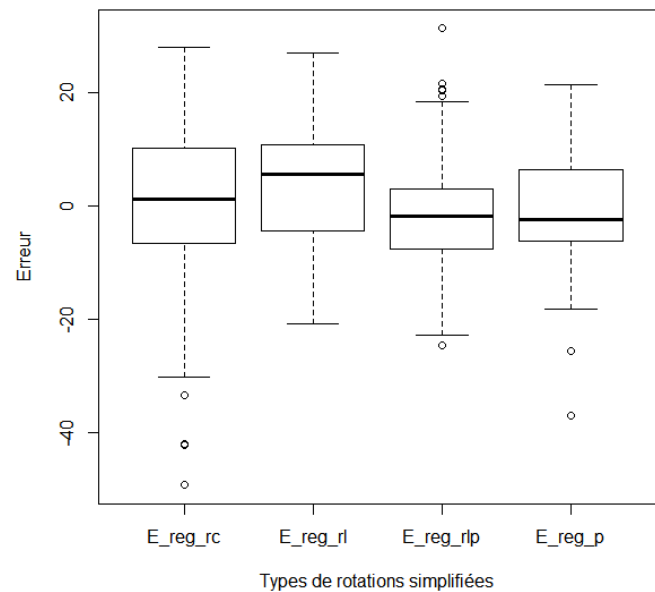


Figure 6 : Boxplot des pourcentages d'erreur entre le pourcentage des rotations mesurées et approximées avec l'ACP des 78 cantons. E_ACP_rc pour l'erreur d'approximation des rotations courtes, rl pour rotation longues, rlp pour rotation longues avec prairie et p pour rotation uniquement prairiale.

La Figure 5 et la Figure 6 nous montrent que les rotations les plus difficiles à approximer sont les rotations « longues » et surtout les rotations « courtes ». En effet, le plus difficile dans cette approche est de retrouver une distribution à partir des assolements, ce qui se voit le plus logiquement à travers ces deux types de rotations. Elles marquent notamment la spécialisation des exploitations agricoles. Pour améliorer les prédictions, il serait intéressant d'y ajouter le pourcentage des typologies des exploitations, qu'il est possible de calculer avec RPG explorer.

Bases de données

Les résultats d'analyses stockés dans la BDAT sont réalisés à la demande des agriculteurs, souvent dans le but de gérer la fertilisation et l'état général de leurs parcelles (Schvartz et al., 1997 ; Saby et al., 2008). Ces échantillons sont issus majoritairement de sols de cultures à grands potentiels plutôt que de sols sous prairies. De plus, la répartition des échantillons est très hétérogène dans le temps et dans l'espace (Saby et al., 2014). L'impact des politiques commerciales des laboratoires d'analyses et des conseillers agricoles influent le choix des analyses et des parcelles à

échantillonner (Lemercier et al., 2006). Par exemple, entre l'Île de France et les Hauts de France, les analyses se sont concentrées sur les sols aptes à recevoir des boues de station d'épuration (Schvartz et al., 2008).

Pour limiter ces biais, le calcul des évolutions issu des données de la BDAT utilise un algorithme⁶ (Saby et al., 2004) comparant les propriétés du sol entre deux périodes pour des résolutions spatiales constantes. Les deuxième et troisième étapes comprennent une sélection des communes ayant plus de 10 analyses provenant d'au moins une commune différente par canton. Le but du prétraitement est (i) d'obtenir des valeurs de moyenne/médiane fiables (ii) d'éviter les évolutions causées par des effectifs d'échantillonnages très différents (d'une dizaine à plusieurs centaines, laissant apparaître une très forte évolution de la teneur en COS). Les analyses issues de ce prétraitement indiquent certainement moins de biais et traitent les échantillons selon leur SAU et non comme de simples individus. Cependant il y a un risque d'échantillonnage de la population, qui restreint le nombre d'échantillons analysés et qui peut amplifier les biais cités précédemment. La mise en évidence de l'impact négatif de la MOA granivore épandue sur culture doit être prise en considération selon les biais présentés. De plus, l'évolution des cheptels granivores provient des données du recensement agricole des années 2000 et 2010. Ces cheptels sont très fluctuants selon les demandes (surtout pour les volailles). Ainsi, les évolutions de ces cheptels ne sont peut-être pas aussi continues que ce que notre modèle considère. À l'inverse, les cheptels herbivores sont beaucoup plus stables dans le temps et les évolutions sont plus lentes. Les évolutions du recensement agricole à partir de l'année 1988 n'ont pas été prises en compte, car ces données furent moins fiables et les méthodes de répertorisation différentes. Les données de la BDAT entre 1990 et 1994 n'ont pas non plus été utilisées, car certaines régions d'intérêts (Normandie et Massif Central) ne possédaient pas suffisamment d'analyses.

Dans les analyses des rotations, les résultats nous ont montré qu'entre le recensement agricole et les données ASP, ces bases de données n'exprimaient pas les mêmes pourcentages d'occupation du sol (certainement à cause de la déclaration des surfaces prairiales dans la PAC) et les déclarations entre prairies permanentes et temporaires ne sont pas toujours objectives (Hischler et al., *à paraître*). De plus, chaque parcelle n'est pas forcément déclarée tous les ans et celles qui sont déclarées pour chaque année des huit ans de l'analyse représentent environ 50% des surfaces du recensement agricole : ce qui diminue la représentativité au sein d'un même canton. Ces caractéristiques rendent d'autant plus difficile l'analyse précise et à grande échelle de l'influence des types de rotations simplifiées.

⁶ méthode de ré-échantillonnage de Monte-Carlo

Conclusion

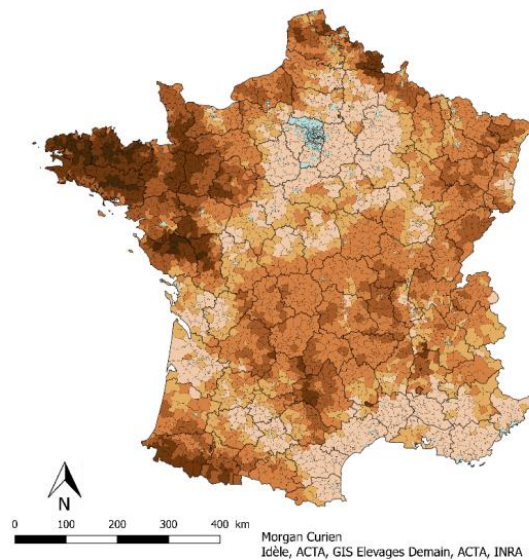
Les résultats confirment les résultats de travaux antérieurs et montrent que la teneur en COS est influencée par les données climatiques, la granulométrie, des variables d'occupation du sol liées à l'élevage. L'étude de l'évolution de la teneur en COS, a permis de préciser l'effet des variables agricoles. La nature des effluents montre un rôle important, sous forme de fumier l'influence sur la teneur en COS est positive contrairement au lisier. L'effet positif des effluents d'élevage herbivores totaux récoltés en bâtiment et amendés sur les cultures a été observé. Les effluents des granivores épandus sur les cultures qui semblent avoir un impact négatif. Les effluents animaux épandus sur les prairies n'ont pas montré d'effet, ce qui est certainement le fait de la faible représentativité des sols prairiaux dans la BDAT. De manière générale, les effluents d'élevage granivores ont montré de faibles impacts sur le COS, certainement en raison de la grande variabilité annuelle des cheptels (fortement dépendant de la demande). L'effet des rotations dites "longues" semble montrer un impact négatif sur le COS, mais le nombre de cantons où les rotations ont été calculé reste assez faible. Il serait intéressant d'augmenter le nombre de calcul pour mieux discerner l'effet des rotations.

Selon la population étudiée (cantons totaux ou issus du prétraitement), la significativité des résultats est différentes pour les effluents animaux. Cet aspect met en évidence la limite de la BDAT. Il en est de même avec les données des cheptels granivores issues du recensement agricole. En dépit des travaux antérieurs (essentiellement fondamentaux), l'effet des effluents granivores s'est montré faiblement significatif ou nul.

En dépend de ces limite, il apparaît que l'élevage joue un rôle prépondérant dans le maintien et l'amélioration de la teneur en carbone organique des sols. Il apparaîtrait intéressant d'améliorer les bases de données concernant les granivores auprès des instituts plus spécialisés. De plus de très récentes bases de données sur Agreste sont apparues au niveau cantonal (Juillet 2018) telles que la présence des couverts végétaux pour les pièges à nitrates ou comme engrais verts, des cultures dérobées en hiver, des résidus du précédent cultural en hiver, la monoculture sur les 3 dernières campagnes, le travail du sol (labour, sans retournement ou réduit, semis direct), et la SAU n'ayant reçu aucun engrais minéral. Etudier leur influence et leur complémentarité avec les effluents animaux, pourraient consolider le constat de l'impact de l'élevage.

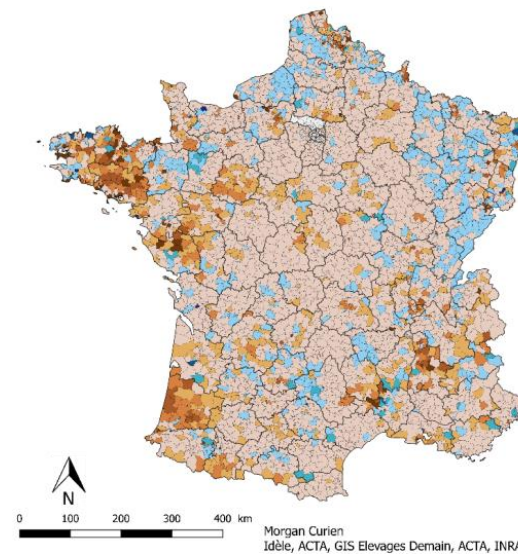
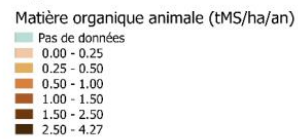
ANNEXES

Annexe A



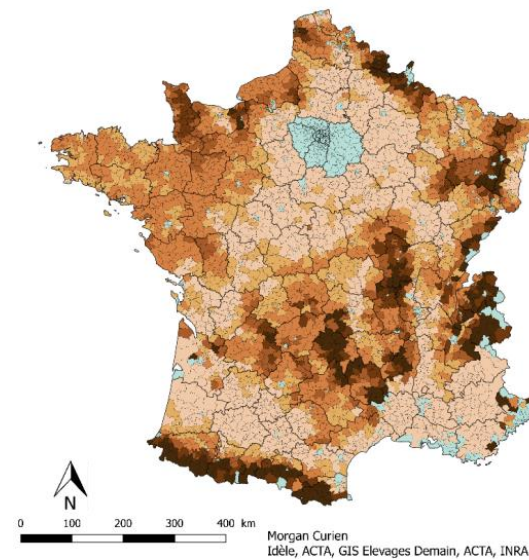
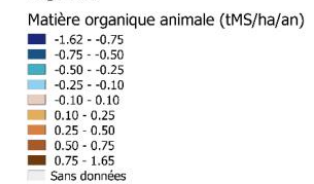
Matière organique animale totale (herbivore et granivore) récoltée en bâtiment en 2010

Légende



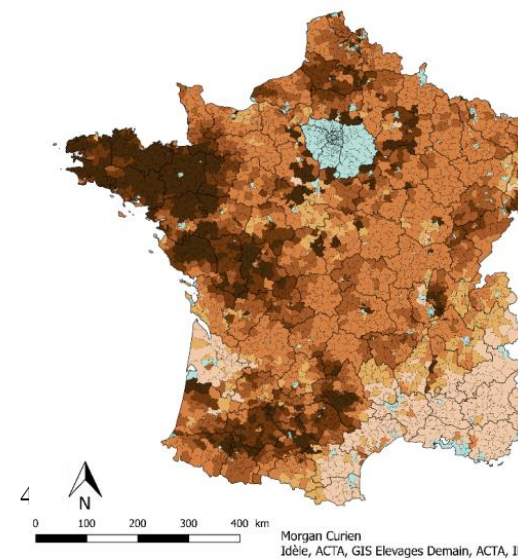
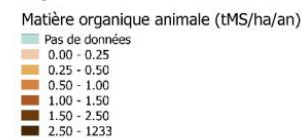
Evolution de la matière organique animale totale (herbivore et granivore) récoltée en bâtiment entre 2000 et 2010

Légende



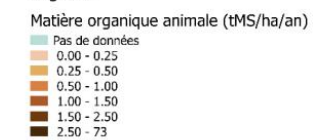
Matière organique animale herbivore épanchée sur les cultures en 2010

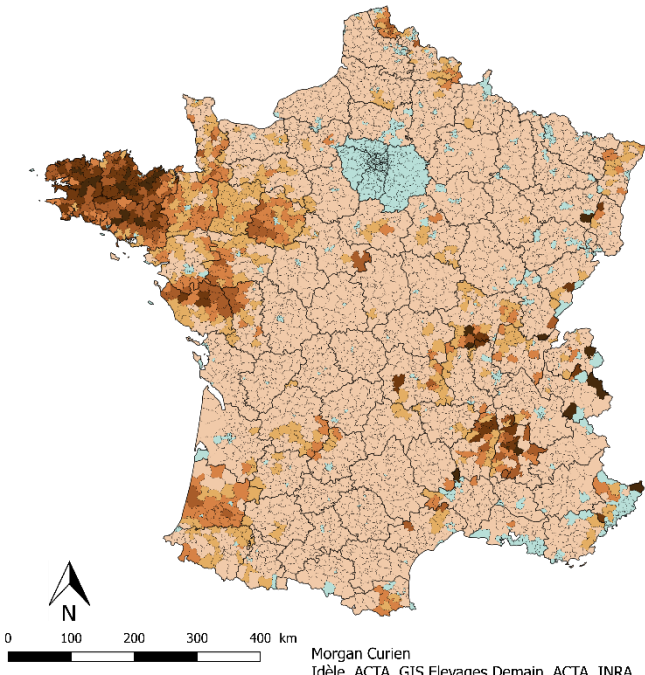
Légende



Matière organique animale herbivore épanchée sur les prairies en 2010

Légende

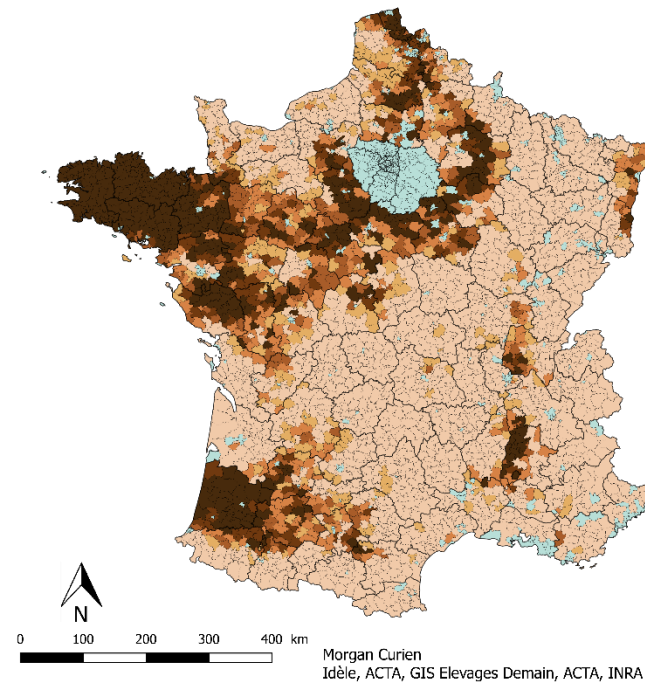
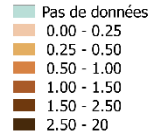




Matière organique animale
granivore épanchée sur les
cultures en 2010

Légende

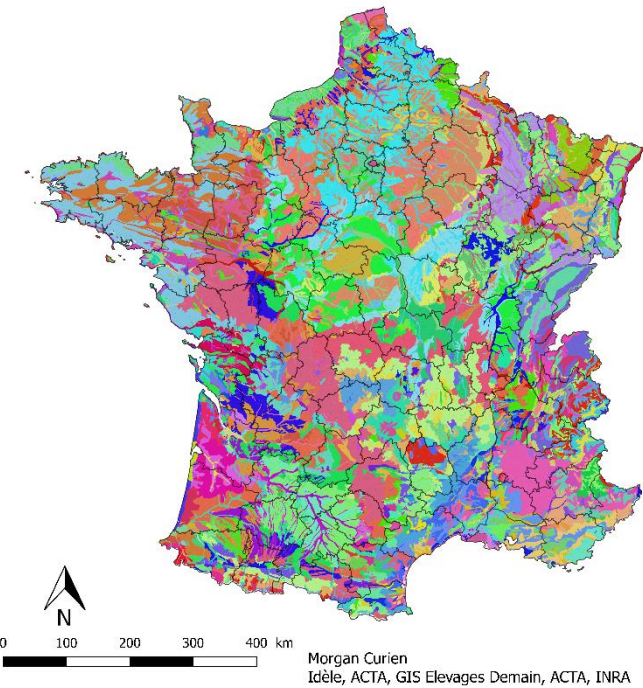
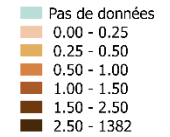
Matière organique animale (tMS/ha/an)



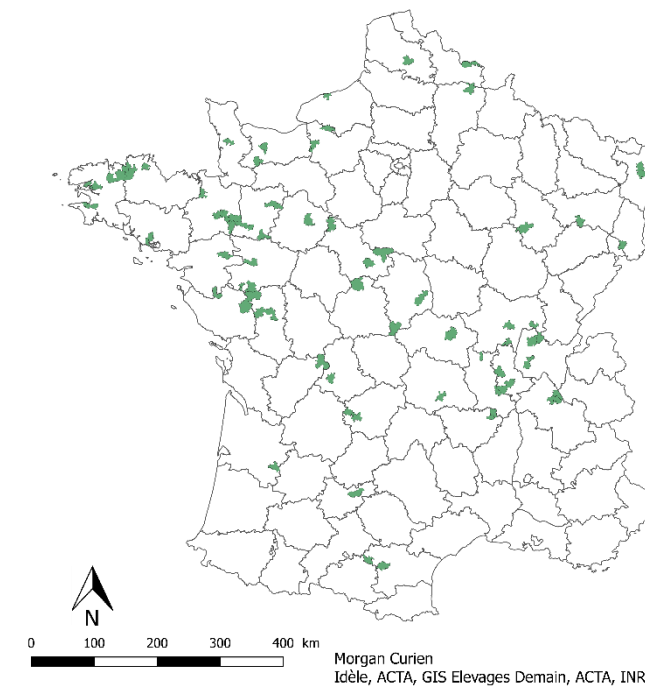
Matière organique animale
granivore épanchée sur les
prairies en 2010

Légende

Matière organique animale (tMS/ha/an)



Carte des unités pédoclimatiques :
comprend 259 unités issues de 60
types de sols et de 8 types de climat.



Cantons sélectionnés pour le
calcul des rotations

Légende

■ Cantons sélectionnés

Tableau 10 : Moyenne nationale de la teneur en carbone organique du sol en fonction des différents types d'occupation du sol (Saby et al., 2014)

| TYPE D'OCCUPATION | MOYENNE DE LA TENEUR EN COS |
|----------------------|-----------------------------|
| CULTURE | 5,16 |
| PRAIRIES PERMANENTES | 8,46 |
| FORETS | 8,1 |
| VIGNES | 3,43 |
| ZONES HUMIDES | 15,2 |
| AUTRES | 4,96 |
| VERGERS | 4,65 |

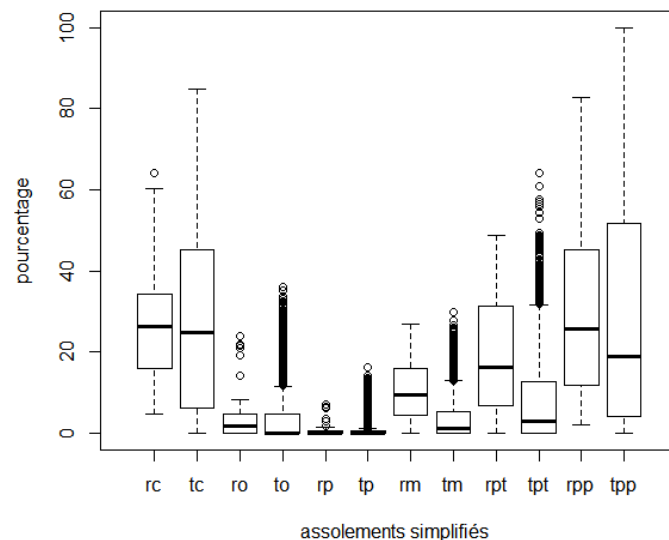


Figure 6 : Boîte à moustache du pourcentage des différents types d'assolements simplifiés de l'échantillon (première lettre "r") et de la population (première lettre "t", tous les cantons de France). La deuxième lettre correspond à type d'assolement : "c" pour céréales, "o" pour oléagineux, « p » pour protéagineux, « m » pour maïs, « pt » pour prairie temporaire et « pp » pour prairie permanentes.

Tableau 11 : Régression GLS de l'évolution de la teneur en COS en fonction des variables pédoclimatiques et agricoles. La première régression correspond à la régression réalisée sur tous les cantons, la deuxième utilise les mêmes variables mais est réalisée avec les cantons issus du prétraitement (seules les variables montrant des différences ont été présentées).

| | Premier décile -2.72 g/kg | | | Premier quartile -0.97 g/kg | | | Médiane 0.32 g/kg | | | Moyenne 0.098 g/kg | | | Dernier quartile 1.34 g/kg | | Dernier décile 2.79 g/kg | | | |
|--------------------------------------|------------------------------|---------------------|------------|--------------------------------|---------------------|------------|----------------------|---------------------|------------|-----------------------|---------------------|------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------|---------------------|------------|
| | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | | Estimate | Pr(> z) | |
| Régression 1 : | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Constante | -8.47E-01 | 2.27E-01 | | -6.92E-01 | 3.61E-01 | | -3.33E-01 | 7.13E-01 | | -4.77E-01 | 6.09E-01 | | 2.84E-01 | 8.18E-01 | | -3.52E-01 | 8.42E-01 | |
| Teneur moyenne en COS en 2000 | -4.59E-01 | < 2.2e-16 | *** | -3.96E-01 | < 2.2e-16 | *** | -3.56E-01 | < 2.2e-16 | *** | -3.66E-01 | < 2.2e-16 | *** | -3.41E-01 | < 2.2e-16 | *** | -4.69E-01 | < 2.2e-16 | *** |
| Evol. MOAh du fumier | 1.13E+00 | 6.18E-02 | . | 1.29E+00 | 4.82E-02 | * | 1.40E+00 | 7.15E-02 | . | 1.48E+00 | 6.52E-02 | . | 1.59E+00 | 1.35E-01 | | 3.84E+00 | 1.12E-02 | * |
| Evol. MOAh du lisier | -3.76E+00 | 6.07E-01 | | -7.14E+00 | 3.65E-01 | | -1.14E+01 | 2.26E-01 | | -1.18E+01 | 2.25E-01 | | -1.70E+01 | 1.86E-01 | | -4.25E+01 | 2.09E-02 | * |
| Evol. MOA des porcs | 2.65E+00 | 1.59E-01 | | 1.81E+00 | 3.71E-01 | | 3.00E-01 | 9.02E-01 | | 1.71E+00 | 4.92E-01 | | 1.03E+00 | 7.55E-01 | | 3.65E+00 | 4.38E-01 | |
| Evol. MOA du lisier des volailles | 2.05E+00 | 9.16E-01 | | -7.21E-01 | 9.73E-01 | | 1.36E+00 | 9.57E-01 | | -7.91E+00 | 7.59E-01 | | -1.71E+01 | 6.17E-01 | | -4.25E+01 | 3.83E-01 | |
| Evol. MOA du lisier des volailles | 1.91E-01 | 5.16E-01 | | 9.29E-02 | 7.70E-01 | | -2.18E-02 | 9.54E-01 | | 1.30E-01 | 7.38E-01 | | 2.71E-01 | 5.99E-01 | | 8.64E-01 | 2.39E-01 | |
| Régression 2 : | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Evol. MOAh du fumier | 1.04E+00 | 3.65E-02 | * | 1.09E+00 | 4.12E-02 | * | 1.46E+00 | 4.25E-02 | * | 1.08E+00 | 1.73E-01 | | 1.38E+00 | 2.04E-01 | | 3.01E+00 | 5.98E-02 | . |
| Evol. MOAh du lisier | -1.03E+01 | 9.83E-02 | . | -1.39E+01 | 3.99E-02 | * | -2.49E+01 | 6.15E-03 | ** | -1.50E+01 | 1.32E-01 | | -2.5E+01 | 6.88E-02 | . | -3.46E+01 | 8.62E-02 | . |
| Evol. MOA des porcs | 1.89E+00 | 2.10E-01 | | 9.26E-01 | 5.69E-01 | | 8.51E-01 | 6.97E-01 | | 2.25E+00 | 3.48E-01 | | 3.62E+00 | 2.70E-01 | | 7.57E+00 | 1.18E-01 | |
| Evol. MOA du lisier des volailles | -1.46E+00 | 9.24E-01 | | -1.07E+01 | 5.16E-01 | | -1.27E+01 | 5.66E-01 | | -3.05E+01 | 2.08E-01 | | - | 4.45E+01 | | -1.00E+02 | 4.09E-02 | * |
| Evol. MOA du fumier des volailles | -7.50E-03 | 9.75E-01 | | 6.61E-03 | 9.80E-01 | | -2.53E-02 | 9.42E-01 | | 2.49E-01 | 5.14E-01 | | 3.83E-01 | 4.61E-01 | | 1.37E+00 | 7.46E-02 | . |

Références

- Accoe, F., Boeckx, P., Van Cleemput, O., Hofman, G., Hui, X., Bin, H., & Guanxiong, C. (2002). Characterization of soil organic matter fractions from grassland and cultivated soils via C content and $\delta^{13}\text{C}$ signature. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 16(23), 2157-2164.
- Afnor, 1999. Qualité des sols, volume I. Tech. rep., Afnor.
- Arrouays, D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. (2002), Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective. Synthèse. INRA. 32 p.
- Arrouays, D., Saby, N., Walter, C., Lemercier, B., & Schvartz, C. (2006). Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use and Management*, 22(1), 48-51.
- Aubin, J., Batka, M., Beldame, D., Boixadera, J., Bousquet-Mélou, A., Benoît, M., ... & Delfosse, C. (2016). Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Rapport d'expertise scientifique collective réalisé à la demande des ministères en charge de l'Environnement et de l'Agriculture, et de l'Ademe.
- Bardgett, R. D., & Wardle, D. A. (2003). Herbivore-mediated linkages between aboveground and belowground communities. *Ecology*, 84(9), 2258-2268.
- Bdat.gissol.fr. (2018). *Geosol / index*. [online] Available at: <http://bdat.gissol.fr/> [Accessed 8 Aug. 2018].
- Bellamy, P. H., Loveland, P. J., Bradley, R. I., Lark, R. M., & Kirk, G. J. (2005). Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003. *Nature*, 437(7056), 245.
- Blair, N., & Crocker, G. J. (2000). Crop rotation effects on soil carbon and physical fertility of two Australian soils. *Soil Research*, 38(1), 71-84.
- Bodet, J. (2001). *Fertiliser avec les engrais de ferme*. Paris: Institut de l'Élevage.
- Boiffin, J., & Fleury, A. (1974). Quelques conséquences agronomiques du retournement des prairies permanentes. In *Annales Agronomiques* (Vol. 25, No. 4, pp. 555-573).
- Bretagnolle, V., Balent, G., Thenail, C., & Berthet, E. (2012). Gestion de la biodiversité en milieu céréalier intensif: importance des prairies aux échelles locales et régionales. *Innovations Agronomiques*, 22, pp-31.
- Capriel, P. (2013). Trends in organic carbon and nitrogen contents in agricultural soils in Bavaria (south Germany) between 1986 and 2007. *European Journal of Soil Science*, 64(4), 445-454.
- Chabbi, A., Cellier, P., Rumpel, C., Gastal, F., & Lemaire, G. (2012). Cycle du carbone et risques environnementaux dans les écosystèmes prairiaux. *Innovations Agronomiques*, 22, 17-30.
- Christensen, B. T. (1992). Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. In *Advances in soil science* (pp. 1-90). Springer, New York, NY.
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., ... & Chevallier, F. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437(7058), 529.
- Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081), 165.
- Degan F., Bispo A., Chenu C., Balloy B., Metzger L., Cluzeau D. (2016). Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols.

- Depeyrot, J.N., Perrot, C., Dedieu, M.S. (2015). Les fermes laitières de polyculture-élevage : atouts et défis pour l'avenir. Centre d'études et de prospectives, Analyse 86, 1–8.
- Derner, J. D., & Schuman, G. E. (2007). Carbon sequestration and rangelands: a synthesis of land management and precipitation effects. *Journal of soil and water conservation*, 62(2), 77-85.
- Derner, J. D., & Schuman, G. E. (2007). Carbon sequestration and rangelands: a synthesis of land management and precipitation effects. *Journal of soil and water conservation*, 62(2), 77-85.
- Dexter, A. R., Richard, G., Arrouays, D., Czyż, E. A., Jolivet, C., & Duval, O. (2008). Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma*, 144(3-4), 620-627.
- Dong-Sheng, Y. U., Xue-Zheng, S. H. I., Hong-Jie, W. A. N. G., Wei-Xia, S. U. N., Warner, E. D., & Qing-Hua, L. I. U. (2007). National Scale Analysis of Soil Organic Carbon Storage in China Based on Chinese Soil Taxonomy1. *Pedosphere*, 17(1), 11-18.
- Dussol, A.-M., Hilal, M., Kroll, J.-C., 2003. 30 ans de PAC : Plus de grandes cultures, moins de fourrages, autant de disparités géographiques. *Agreste Cahiers* 3, 27–33.
- Fierer, N., Craine, J. M., McLauchlan, K., & Schimel, J. P. (2005). Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition. *Ecology*, 86(2), 320-326.
- Fliessbach, A., Oberholzer, H. R., Gunst, L., & Mäder, P. (2007). Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1-4), 273-284.
- Gaigné, C. (2012). Organisation des filières animales et environnement. Vingt ans après la directive nitrates. *Productions Animales*, 25(4), 375.
- Girard, M. (2011). *Sols et environnement*. Paris: Dunod.
- Goidts, E., & van Wesemael, B. (2007). Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in Southern Belgium (1955–2005). *Geoderma*, 141(3-4), 341-354.
- Guo, L. B., & Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global change biology*, 8(4), 345-360.
- Gupta, R. K., & Rao, D. L. N. (1994). Potential of wastelands for sequestering carbon by reforestation. *Current science*, 378-380.
- Hassink, J., & Whitmore, A. P. (1997). A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 131-139.
- Henin, S. et Dupuis M 1945 Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. Agron*, 15, 17-29.
- Herfurth, D. (2015). Impact des pratiques de gestion sur le stockage du Carbone dans le sol des écosystèmes prairiaux (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II).
- Herfurth, D. (2015). Impact des pratiques de gestion sur le stockage du Carbone dans le sol des écosystèmes prairiaux (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II).
- Hirschler J., Gourlaouen Y., Dubosc N., Lafont M., Perrot C. Ramonteu S. (à paraître). Projet Casdar RED SPyCE, "résilience, efficacité et durabilité des systèmes de polyculture élevage".
- Houot, S. (2005). Recyclage de déchets sur les sols: valeur agronomique et impacts environnementaux. *Sols et Environnement» MC Girard, C. Walter, JC Rémy, J. Berthelin, JL Morel editeurs. Dunod*, 262-284.

- Houot, S., Pons, M. N., Pradel, M., Aubry, C., Augusto, L., Barbier, R., ... & Dabert, P. (2014). Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques.
- Institut de l'élevage, (2007). Evaluation des durées de présence en bâtiments par régions administratives et par OTEX. Extrait base de données PMPOA II, Dossier NOPOLU gaz à effet de serre
- Issanchou A. (2017). Soil quality management by farmers: profitability and sustainability issues for agricultural farms. Ecole Doctorale sciences Economiques et sciences De Gestion, AGROCAMPUS OUEST.
- Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailles, J., Hilal, M., & Wavresky, P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Kallenbach, C., & Grandy, A. S. (2011). Controls over soil microbial biomass responses to carbon amendments in agricultural systems: A meta-analysis. *Agriculture, ecosystems & environment*, 144(1), 241-252.
- Kirschbaum, M. U. (2000). Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming?. *Biogeochemistry*, 48(1), 21-51.
- Klump, K., Tallec, T., Guix, N., & Soussana, J. F. (2011). Long-term impacts of agricultural practices and climatic variability on carbon storage in a permanent pasture. *Global Change Biology*, 17(12), 3534-3545.
- Krugman, P. (1991). Increasing returns and economic geography. *Journal of political economy*, 99(3), 483-499.
- Lal, R., & Kimble, J. M. (1997). Conservation tillage for carbon sequestration. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 49(1-3), 243-253.
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60.
- Leifeld, J., & Fuhrer, J. (2010). Organic farming and soil carbon sequestration: what do we really know about the benefits?. *Ambio*, 39(8), 585-599.
- Lemercier, B., Walter, C., Schwartz, C., Saby, N. P. A., Arrouays, D., & Follain, S. (2006). Suivi des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible dans les sols agricoles de trois régions françaises. *Etude Gest. Sols*, 13, 165-180.
- Letten, S., Van Orshoven, J. O. S., Van Wesemael, B. A. S., Muys, B., & Perrin, D. (2005). Soil organic carbon changes in landscape units of Belgium between 1960 and 2000 with reference to 1990. *Global Change Biology*, 11(12), 2128-2140.
- Loveland, P., & Webb, J. (2003). Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil and Tillage Research*, 70(1), 1-18.
- Luo, Z., Wang, E., & Sun, O. J. (2010). Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture, ecosystems & environment*, 139(1-2), 224-231.
- Maguire, R. O., Kleinman, P. J., & Beegle, D. B. (2011). Novel manure management technologies in no-till and forage systems: Introduction to the special series. *Journal of environmental quality*, 40(2), 287-291.
- Martin P., Levavasseur, F., Bouty C., Scheurer O. (2018). Anon, (2018). [online] Available at: <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/RPGEXPLORER/> [Accessed 9 Aug. 2018].

- Martin, M. P., Orton, T. G., Lacarce, E., Meersmans, J., Saby, N. P. A., Paroissien, J. B., ... & Arrouays, D. (2014). Evaluation of modelling approaches for predicting the spatial distribution of soil organic carbon stocks at the national scale. *Geoderma*, 223, 97-107.
- McSherry, M. E., & Ritchie, M. E. (2013). Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global Change Biology*, 19(5), 1347-1357.
- Meersmans, J., Martin, M. P., Lacarce, E., De Baets, S., Jolivet, C., Boulonne, L., ... & Arrouays, D. (2012). A high resolution map of French soil organic carbon. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(4), 841-851.
- Milchunas, D. G., & Lauenroth, W. K. (1993). Quantitative Effects of Grazing on Vegetation and Soils Over a Global Range of Environments: Ecological Archives M063-001. *Ecological monographs*, 63(4), 327-366.
- Modélisation de la séquestration de carbone à long terme AMG, de l'Inra de Lyon. Agro-transfert-rt.org. (2018). *ABC'Terre : Atténuation du Bilan de gaz à effet de serre agricole intégrant le Carbone du sol, sur un TERRitoirE (2013-2016) – AGRO-TRANSFERT*. [online] Available at: <http://www.agro-transfert-rt.org/projets/bilan-gaz-effet-serre-abcterre/> [Accessed 9 Aug. 2018].
- Mondini, C., & Sequi, P. (2008). Implication of soil C sequestration on sustainable agriculture and environment. *Waste Management*, 28(4), 678-684.
- Mulder, V. L., Lacoste, M., Martin, M. P., Richer-de-Forges, A., & Arrouays, D. (2015). Understanding large-extent controls of soil organic carbon storage in relation to soil depth and soil-landscape systems. *Global Biogeochemical Cycles*, 29(8), 1210-1229.
- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., & Paruelo, J. M. (2006). Carbon sequestration in semi-arid rangelands: comparison of *Pinus ponderosa* plantations and grazing exclusion in NW Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 67(1), 142-156.
- Paroissien J.B., Degan F., Perrot C., Philibert A., Saby N. P.A., Martin M. Gouny L., Dupraz P., (à paraître). Évolution des teneurs en carbone organique dans les régions d'élevage en France entre 1990-2014
- Perrot, C., Barbin, G., Bossis, N., Champion, F., Morhain, B., Morin, E. (2013). L'élevage d'herbivores au Recensement agricole 2010. Le dossier Economie de l'Elevage 400-441, 1-96.
- Pflimlin, A., Faverdin, P., & Béranger, C. (2009). Un demi-siècle d'évolution de l'élevage bovin. Bilan et perspectives. *Fourrages (200)*, 429-464.(2009).
- Poeplau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Van Wesemael, B. A. S., Schumacher, J., & Gensior, A. (2011). Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone—carbon response functions as a model approach. *Global change biology*, 17(7), 2415-2427.
- Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global change biology*, 6(3), 317-327.
- Calvet, R., Chenu, C., Houot, S. (2015). Les matières organiques des sols. *La France agricole*
- Reeder, J. D., & Schuman, G. E. (2002). Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands. *Environmental pollution*, 116(3), 457-463.
- Riley, H., & Bakkegard, M. (2006). Declines of soil organic matter content under arable cropping in southeast Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 56(3), 217-223.

- Roguet, C., Gaigné, C., Chatellier, V., Cariou, S., Carlier, M., Chenu, R., ... & Perrot, C. (2015). Spécialisation territoriale et concentration des productions animales européennes: état des lieux et facteurs explicatifs. *INRA Prod. Anim*, 28(1), 5-22.
- Ros, G. H., Temminghoff, E. J. M., & Hoffland, E. (2011). Nitrogen mineralization: a review and meta-analysis of the predictive value of soil tests. *European Journal of Soil Science*, 62(1), 162-173.
- Rouquette, J. L., & Pflimlin, A. (1995, September). Les grandes régions d'élevage en France: proposition de zonage pour la France. In *5ème Symposium International pour la nutrition des herbivores, Institut de l'Élevage, Clermont Ferrand* (Vol. 14).
- Ryschawy, J., Tichit, M., Bertrand, S., Allaire, G., Plantureux, S., Aznar, O., ... & AUBERT15, C. (2015). Comment évaluer les services rendus par l'élevage? Une première approche méthodologique sur le cas de la France. *INRA Prod. Anim*, 28(1), 23-38.
- Saby, N. P. A., Arrouays, D., Antoni, V., Lemercier, B., Follain, S., Walter, C., & Schwartz, C. (2008). Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990–2004. *Soil Use and Management*, 24(3), 254-262.
- Saby, N. P. A., Brus, D. J. & Arrouays, D. (2014). Comparison of the several methods to estimate of the sampling variance from a systematic random sampling: application to the French soil monitoring network data. In: Jeannée, N. & Romary, T. (eds.) *GeoEnv*. Paris.
- Saby, N., Foucaud Lemercier, B., Arrouays, D., Leménager, S., Louis, B., Millet, F., ... & Toutain, B. (2014). Le programme Base de Données des Analyses de Terre (BDAT): Bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses. *Etude et Gestion des Sols* (21), 141-150.(2014).
- Saby, N., Schwartz, C., Walter, C., Arrouays, D., Lemercier, B., Roland, N., & Squvidant, H. (2004). Base de Données des Analyses de Terre: Procédure de collecte et résultats de la campagne 1995-2000. *Etude et Gestion des sols*, 11(3), 235-253.
- Saiz, G., Bird, M. I., Domingues, T., Schrod, F., Schwarz, M., Feldpausch, T. R., ... & Diallo, A. (2012). Variation in soil carbon stocks and their determinants across a precipitation gradient in West Africa. *Global change biology*, 18(5), 1670-1683.
- Schwartz, C., Walter, B., Bouedo, T., & Aurousseau, P. (1997). Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994: I. Constitution d'une banque de données cantonale. *Etude et gestion des sols*, 4, 191-204.
- Schwartz, C., Thorette, J., & Follain, S. (2008). Représentation cartographique nationale d'un Indice cantonal d'Acceptabilité des sols à l'Épandage agricole de boues de stations d'épuration calculé à partir de la Base de Données nationale d'Analyses de Terre. *Etude et Gestion des Sols* 1 (15), 37-49.(2008).
- Six, J., Elliott, E. T., & Paustian, K. (1999). Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5), 1350-1358.
- Sleutel, S., De Neve, S., Hofman, G., Boeckx, P., Beheydt, D., Van Cleemput, O., ... & Verbeeck, H. (2003). Carbon stock changes and carbon sequestration potential of Flemish cropland soils. *Global Change Biology*, 9(8), 1193-1203.
- Smith, W. N., Grant, B. B., Campbell, C. A., McConkey, B. G., Desjardins, R. L., Kröbel, R., & Malhi, S. S. (2012). Crop residue removal effects on soil carbon: Measured and inter-model comparisons. *Agriculture, ecosystems & environment*, 161, 27-38.

- Sogreah, A., & Deporte, I. (2007). Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine: bilan qualitatif de la contamination par les éléments tracés métalliques et les composés tracés organiques et application quantitative pour les éléments tracés métalliques. Tech. rep. French Environment and Energy Management Agency. ADEME
- Soussana, J. F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T., & Arrouays, D. (2004). Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil use and management*, 20(2), 219-230.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales Mendez, M., & De Haan, C. (2009). L'ombre portée de l'élevage: impacts environnementaux et options pour leur atténuation.
- Swiderski, C., Saby, N., Party, J. P., Sauter, J., Köller, R., Vandijk, P., ... & Arrouays, D. (2012). Evolution des teneurs en carbone organique dans l'horizon de surface des sols cultivés en Alsace: Analyse à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. *Étude et Gestion des sols*, 19(3-4), 179-192.
- West, T. O., & Post, W. M. (2002). Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1930-1946.
- Xiao, Y., Mignolet, C., Mari, J. F., & Benoît, M. (2015). Characterizing historical (1992–2010) transitions between grassland and cropland in mainland France through mining land-cover survey data. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(8), 1511-1523.
- YANG x.M., KAY B.D. (2001) : "Rotation and tillage effects on soil organic carbon sequestration in a typic Hapludalf in Southern ontario", *Soil Tillage Res.*, 59, 107-114
- Yong-Zhong, S., Yu-Lin, L., Jian-Yuan, C., & Wen-Zhi, Z. (2005). Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, northern China. *Catena*, 59(3), 267-278.
- Yu, R., Xu, Y., Zhou, T., & Li, J. (2007). Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China. *Geophysical research letters*, 34(13).

RÉSUMÉ

L'élevage occupe la majeure partie de la surface agricole en France et impacte différemment l'environnement selon les contextes pédoclimatiques et de gestion agricole. Il influence notamment les teneurs en carbone organique du sol (COS). Différents travaux ont analysé plusieurs liens entre l'élevage et la teneur en COS, mais son rapprochement avec l'influence directe des animaux est difficilement perceptible à grande échelle. L'objectif de ce travail est de mobiliser les bases de données pédologiques et agricoles françaises afin d'analyser les liens existant entre les variables agricoles concernées par l'élevage et l'évolution de la teneur en carbone organique des sols. La Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) est mobilisée entre les périodes de 2000 à 2014 pour les variables du sol. Les recensements agricoles de 2000 et 2010, les données issues de la Politique Agricole Commune de 2007 à 2014 (ASP), celles du Programme de Maîtrise des Polluants d'Origine Agricole de 2007, et les données de l'institut de l'élevage sont utilisées pour les variables agricoles. Les données climatiques employées sont celles issues de Joly et al.(2010). L'échelle spatiale des analyses est le canton et l'emprise est la France métropolitaine. Un calcul de la matière organique animale épandue est réalisé sur l'ensemble de la France et des calculs de rotations ont été réalisés sur 78 cantons. L'analyse des liens entre la teneur en COS et son évolution avec des variables pédoclimatiques et de pratiques agricoles telles que l'épandage de matières organiques animales, est calculée par des régressions linéaires multiples.

Les résultats obtenus montrent que la teneur en COS est influencée par les données climatiques, la teneur en argile, des variables d'occupation du sol liées à l'élevage (surfaces en céréales, maïs, prairies temporaires et permanentes) confirmant les résultats de travaux antérieurs. La nature des effluents récoltés en bâtiment joue un rôle important, sous forme de fumier l'influence sur la teneur en COS est positive contrairement au lisier. L'effet positif sur la teneur en COS des effluents d'élevage herbivore totaux récoltés en bâtiment et amendés sur les cultures a été observé, contrairement aux effluents des granivores épandus sur les cultures qui semblent avoir un impact négatif sur la teneur en COS. Les effluents animaux épandus sur les prairies n'ont pas montré d'effet significatif sur la teneur en COS, ce qui peut être dû à la faible représentativité des sols prairiaux dans la BDAT. L'effet des rotations longues (contenant plus de deux groupes de cultures de l'ASP) semble montrer un impact significativement négatif de celles-ci sur la teneur en COS, toutefois le nombre de cantons où les rotations ont été calculées reste assez faible.

En dépit des limites liées aux bases de données utilisées, il apparaît que l'élevage joue un rôle prépondérant dans le maintien et l'amélioration de la teneur en carbone organique des sols.

ABSTRACT

Livestock farming occupy most of the agricultural area in France and have a different impact on the environment according to pedoclimatic and agricultural management contexts. In particular, it influences soil organic carbon (SOC) content. Different studies have analyzed several links between livestock and SOC content, but its approximation to the direct influence of animals is difficult to perceive on a large scale. The aim of this work is to mobilize French pedological and agricultural databases in order to analyze the links between the agricultural variables concerned by livestock farming and the evolution of soil organic carbon content. The “Base de Données des Analyses de Terre” (BDAT) is mobilized between the periods of 2000 to 2014 for soil variables. The “Recensement Agricole” of 2000 and 2010, the data from the Common Agricultural Policy from 2007 to 2014 (ASP), those of the “Programme de Maîtrise des Polluants d’Origine Agricole” of 2007, and the data of the ‘Institut de l’élevage’ are used for agricultural variables. The climatic data used are those from Joly et al (2010). The spatial scale of analyzes is the canton and the geographic extent is metropolitan France. A calculation of the animal organic matter spread is carried out on the whole of France and calculations of rotations were carried out on 78 cantons. The analysis of the links between SOC content and its evolution with pedoclimatic variables and agricultural practices such as the spreading of animal organic matter is calculated by multiple linear regressions with method of least squares.

The obtained results show that the SOC content is influenced by climatic data, clay content, and land-use variables related to livestock (cereal, maize, temporary and permanent grassland areas) confirming the results of the previous work. The nature of the effluents collected in barn plays an important role, in the form of solid manure the influence on the content of COS is positive unlike liquid manure. The positive effect on the SOC content of the total herbivore livestock manure harvested in barn and amended on crops was observed, in contrast to the effluents from grain-eating that appear to have a negative impact on SOC content. Animal effluents spread on grasslands have not shown a significant effect on SOC content, which may be due to the low representativeness of grassland soils in BDAT. The effect of “long rotations” (containing more than two groups of PSA cultures) seems to show a significantly negative impact of these on the SOC content, however the number of cantons where rotations were calculated remains quite low.

Notwithstanding the limitations of the databases used, it appears that livestock play a key role in maintaining and improving soil organic carbon content.