

- SUBVENTION CARBIOSOL III -

« Carbone organique, biomasse et activité microbienne des sols :
vers un indicateur de la qualité des sols en Wallonie »

RAPPORT FINAL – Décembre 2016



CAROLINE CHARTIN¹, INKEN KRUGER², BAS VAN WESEMAEL¹ & MONIQUE CARNOL²

1 TECLIM – Earth & Life Institute - ELIC, Université de Louvain, Place Louis Pasteur 3, 1348 Louvain-la-Neuve

2 Laboratoire d'écologie végétale et microbienne, Botanique B22, Université de Liège, Quartier Vallée 1, Chemin de la Vallée 4, 4000 Liège

TABLE DES MATIERES

Introduction.....	9
Objectifs.....	11
1. Prise de contacts nationaux/internationaux.....	12
1.1. Matériels et méthodes.....	12
1.2. Résultats et discussions.....	12
2. Journée d'étude sur la qualité biologique des sols agricoles.....	14
3. Mesure de la variabilité saisonnière des indicateurs biologiques.....	17
3.1. Matériels et méthodes.....	17
Choix des sites.....	17
Prélèvements sur le terrain.....	19
Acquisition de valeurs pour les indicateurs chimiques.....	20
Acquisition de valeurs pour les indicateurs biologiques.....	21
Définition de gammes de valeurs et analyses statistiques.....	24
Effet de pré-incubation sur la respiration.....	25
3.2. Résultats et discussion.....	25
Variabilité saisonnière des sites sous agriculture conventionnelle.....	25
Effet d'une pré-incubation sur la respiration.....	34
Définition des gammes de valeurs 'normales'.....	37
4. Relations entre fractions de carbone organique du sol et indicateurs biologiques.....	45
4.1. Matériels et méthodes.....	45
Mesures des indicateurs biologiques.....	45
Mesures des fractions stable et labile de COS.....	45
4.2. Résultats et discussion.....	46
Teneurs en fractions stable et labile de carbone organique.....	46
Corrélations entre fractions de CO et indicateurs biologiques.....	49
5. Analyse de faisabilité de mesure des fractions de matière organique par spectrométrie infrarouge.....	54
Matériels et méthodes.....	54
Echantillons de sols.....	54
Fractionnement de COS et mesures carbone.....	54
Analyses par Spectrométrie Proche InfraRouge, et estimation du COT et CO_stable.....	54
Résultats et discussion.....	55

Teneurs en carbone organique (COT et CO_stable).....	55
Modèles calibrés et pouvoir prédictif	56
6. « Automatisation » de la cartographie du carbone organique du sol sur base des données de Requasud.....	58
Matériels et méthodes.....	58
Données.....	58
Modèles GAM et co-variables environnementales.....	59
Scripts informatiques	59
Résultats et discussion	60
Densité d’observations : inégalités spatiale, temporelle et inter-occupation de sols	60
Adaptations consécutives de la méthodologie (et scripts)	63
Exemple d’application	63
7. Participation à la mise à jour de l’Etat de l’Environnement Wallon (EEW2016) : le COT	64
Matériels et méthodes.....	64
Données.....	64
Modèles GAM et co-variables environnementales.....	64
Carte des différences estimées en COT.....	64
Scripts informatiques	65
Résultats et discussion	65
Faisabilité des produits.....	65
Précaution pour l’interprétation des résultats cartographiques: une occupation des sols non évolutive	66
Produits fournis : Statistiques descriptives des données de COT	67
Produits fournis : cartes des teneurs en COT et différences.....	72
Conclusions.....	79
Perspectives.....	81
Valorisation des travaux de recherche (publications et colloques)	82
Personalia	83
Références.....	84
ANNEXES.....	87
ANNEXE 1 : Résumé de la discussion du Workshop sur les indicateurs biologiques de la qualité du sol du 15 septembre.....	87
ANNEXE 2 : Invitation et programme de la journée thématique ‘L’activité biologique des sols en agriculture’ du 8 Mars 2016	93

ANNEXE 3 : Article sur la journée thématique ‘L’activité biologique des sols en agriculture’ dans le Sillon belge du 15/04/2016	94
ANNEXE 4 : Box-plots des pressions écosystémiques normalisées (NES) calculées à partir d’une gamme de valeurs normales (NOR) basée sur tous les points sous agriculture conventionnelle (NES112) et d’une NOR basée sur le moment d’échantillonnage correspondant (NES28) par site pour les campagnes d’avril (rouge), de juin (bleu), d’août (vert) et d’octobre (jaune) 2016 classés selon les traitements.....	95
ANNEXE 5 : Box-plots des indicateurs chimiques et biologiques par site pour les campagnes d’avril (rouge), de juin (bleu), d’août (vert) et d’octobre (jaune) 2016 classés selon les traitements.....	96
ANNEXE 6 : Corrélations entre indicateurs chimiques et entre indicateurs biologiques par moment d’échantillonnage	102
ANNEXE 7 : mail synthétisant la demande spécifique de la DEMNA pour la participation de l’équipe CARBIOSOL à la mise à jour de l’EEW2016.....	107
ANNEXE 8 : Produits fournis pour l’EEW2016 - Cartes des erreurs standard de modélisation (sous forme du coefficient de variation CV*) des teneurs en COT sous cultures et prairies pour les périodes 1949-1972 et 2004-2014	109
ANNEXE 9 : Produits fournis pour l’EEW2016 - Cartes des teneurs en COT et des erreurs standard de modélisation (sous forme du coefficient de variation CV*) pour les sols sous forêts pour les périodes 1949-1972 (Horizon de surface) et 2004-2014 (0-20cm).....	110

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Localisation au sein des différentes régions agricoles des exploitations des 33 participants ayant répondu au questionnaire concernant les pratiques de conservation et d'amélioration du sol. Les régions agricoles - 1. Sablo-Limoneuse, 2. Limoneuse, 3. Campine Hennuyère, 4. Condroz, 5. Herbagère Liège, 6. Herbagère Fagnes, 7. Famenne, 8. Ardenne, 9. Jurassique et 10. Haute Ardenne (http://geoportail.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/geoportail/contents/metadata/plainData/6f562464-f478-4f41-99a7-ed28d0cdb7c.html) - superposée à la carte simplifiée d'occupation des sols (basée sur la COSW ; http://cartopro3.wallonie.be/).</i>	<i>15</i>
<i>Figure 2 : Carte synthétique des pratiques de conservation et d'amélioration du sol appliquées au sein des exploitations agricoles des 33 agriculteurs ayant répondu au questionnaire proposé lors de la demi-journée d'étude que la qualité biologique des sols en 2016</i>	<i>16</i>
<i>Figure 3 : Location des 11 sites sélectionnés pour étudier la variabilité saisonnière des indicateurs biologiques. (Les sites 10 et 17 sont localisés par leur référence, les points étant trop proches d'autres pour être visibles à cette échelle).</i>	<i>17</i>
<i>Figure 4 : Schéma méthodologique d'échantillonnage des sols valable pour le réseau CARBOSOL et son complément CARBIOSOL</i>	<i>20</i>
<i>Figure 5 : Températures moyennes en °C et précipitations en mm de l'année 2016 pour Gembloux. Source : meteobelgique.com</i>	<i>26</i>
<i>Figure 6 : Box-plots de la respiration pour l'échantillonnage d'avril (rouge), de juin (bleu), d'août (vert) et d'octobre (jaune) par parcelle après une pré-incubation (a) de 16 heures, (b) de 7 jours, (c) de 14 jours et (d) de 21 jours. Les mêmes lettres indiquent des respirations non-significativement différentes (calculé séparément pour chaque site).</i>	<i>36</i>
<i>Figure 7 : Plots radar des cultures en agriculture conventionnelle pour l'échantillonnage (a) d'avril, (b) de juin, (c) d'août et (d) d'octobre avec les gammes entre valeurs extrêmes en rose, les gammes entre 1^{er} et 3^{ème} quartile en bleu et la médiane en vert.</i>	<i>38</i>
<i>Figure 8 : Plot radar des cultures conventionnelles de tous les moments d'échantillonnage avec les gammes entre valeurs extrêmes en rose, les gammes entre 1^{er} et 3^{ème} quartile en bleu et la médiane en vert en plus des médianes des échantillons des parcelles 6 (rouge / agriculture biologique), 18 (magenta / P&CIPAN), 10 (orange / semis direct) et 11 (jaune / TCS/Claydon).</i>	<i>41</i>
<i>Figure 9 : Plots radar des données pour culture collectés dans (a) le projet CARBIOSOL1 et (b) le projet CARBIOSOL2 avec les gammes entre valeurs extrêmes en rose, les gammes entre 1^{er} et 3^{ème} quartile en bleu et la médiane en vert.</i>	<i>43</i>
<i>Figure 10: Illustration d'un tamisage par voie humide dans le protocole de fractionnement physique d'un échantillon de sols.</i>	<i>45</i>
<i>Figure 11 : Teneurs minimum, moyenne et maximum en carbone organique stable (A), total (B) et labile (C) pour les sites 10, 11, 17 et 18 lors des campagnes I, II et III.</i>	<i>47</i>
<i>Figure 12 : Teneurs moyennes en CO stable (en haut) qui, soustraites au COT, permettent d'obtenir les teneurs en carbone labile (en bas ; valeurs minimum, moyenne et maximum) pour les 11 sites étudiés au cours du projet CARBIOSOL III.</i>	<i>48</i>
<i>Figure 13 : Liens carbone microbien et carbone organique total, carbone dans la fraction labile et carbone extrait à l'eau chaude pour les quatre moments d'échantillonnage (Echantillonnage I en rouge, Echantillonnage II en bleu, Echantillonnage III en vert et Echantillonnage IV en jaune).</i>	<i>53</i>
<i>Figure 14 : Histogrammes des pourcentages de fraction stable (CO_stable) contenue dans le COT pour les échantillons de cultures (à gauche) et de prairies (à droite).</i>	<i>56</i>

Figure 15 : Estimation des teneurs en CO ₂ stable d'après l'Analyse Spectroscopique Proche InfraRouge (SPIR, laboratoire de Tinlot) : plots des valeurs prédites face aux valeurs observées pour les cultures (à gauche) et les prairies (à droite). En rouge, la droite 1 :1.	57
Figure 16 : Evolution du nombre d'observations géoréférencées de COT dans la base de données REQUASUD pour les cultures et les prairies entre 2003 et 2014.	60
Figure 17 : Evolution de la précision des modèles d'estimation du COT pour les sols sous cultures en fonction du nombre de points d'observation (source : données REQUASUD – licence A09/2016 ; données corrigées d'un coefficient).....	62
Figure 18 : Exemple de document d'aide à l'analyse de la densité spatiale des points dans le jeu de données.	63
Figure 19 : Box-plots des teneurs en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous cultures, prairies et forêts pour la période 1949-1972 par régions agricoles (source : Aardewerk – mise à jour du PCNSW).	68
Figure 20 : Box-plots des teneurs en COT (% C ; horizon de surface en cultures et prairies / 0-20cm en forêts) des sols sous cultures, prairies et forêts pour la période 2004-2014 par régions agricoles (source : REQUASUD – licence A09/2016, AardeWerk).....	70
Figure 21 : Cartes des teneurs en COT (% C ; horizon de labour) dans les sols sous cultures et prairies pour la période 1949-1972 (en haut) et la période 2004-2014 (au centre), ainsi que les différences relatives significatives (%) estimées entre ces deux périodes (en bas). Sources : UCL – ELI – TECLIM ; PCNSW ; REQUASUD (licence A09/2016).	73
Figure 22 : Diagrammes des valeurs prédites face aux valeurs observées de COT (% C) dans les jeux de calibration et de validation pour les modèles relatifs aux (A) cultures et (B) prairies et (C) forêts pour la période 1949-1972 (horizons de surface ; source : base de données AardeWerk).....	75
Figure 23 : Diagrammes des valeurs prédites face aux valeurs observées de COT (g C kg ⁻¹) dans les jeux de calibration et de validation pour les modèles relatifs aux (A) cultures, (B) prairies et (C) forêts pour la période 2004-2014 (horizons de surface en cultures et prairies, 0-20cm en forêts; sources : base de données REQUASUD – licence A09/2016 - et base de données de l'IPRFW).....	77
Figure 24 : Diagramme des valeurs prédites face aux valeurs observées de COT (% de carbone ; horizon de surface) dans la seconde moitié du jeu de données d'origine pour les cultures en 2004-2014 (jeu non utilisé pour la calibration du modèle ; source : REQUASUD – licence A09/2016).	78

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Pratiques d’agriculture de conservation appliquées par les agriculteurs ayant participé à un questionnaire lors de la demi-journée d’étude (nombre de participants : 33).....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 2 : Eléments descriptifs des sites échantillonnés (gestion, région agricole, DER et sigle pédologique).....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 3 : Valeurs minimales, médianes, moyennes et maximales pour les indicateurs chimiques par moment d’échantillonnage pour les sept parcelles en agriculture conventionnelle. La valeur p donne le résultat d’une ANOVA avec permutations. Les mesures avec la même lettre minuscule ne sont pas significativement différentes les unes des autres.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 4 : Valeurs minimales, médianes, moyennes et maximales pour les indicateurs biologiques par moment d’échantillonnage pour les sept parcelles en agriculture conventionnelle. La valeur p donne le résultat d’une ANOVA avec permutations. Les mesures avec la même lettre minuscule ne sont pas significativement différentes les unes des autres.</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 5 : Centres des ellipsoïdes à 8 dimensions pour culture en agriculture conventionnelle.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 6 : Résultats des ANOVA avec permutation à deux facteurs (site et moment d’échantillonnage) sur la NES₁₁₂ et la NES₂₈.</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 7 : Largeur des gammes de valeurs (entre minimum et maximum) pour chaque moment d’échantillonnage par rapport au jeu de données entier en %.</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 8 : Largeur des gammes de valeurs (entre 1^{er} et 3^{ème} quartile) pour chaque moment d’échantillonnage par rapport au jeu de données entier en %.</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 9 : Moyennes et mesures de variabilité (variance et coefficient de variation) des teneurs en fraction stable mesurées sur les sites 10, 11, 17 et 18 sur base des campagnes I, II et III (n= 12 par site). * CV (coefficient de variation = écart type / moyenne * 100)</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 10 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques et biologiques (quatre moments d’échantillonnage, n=44). Les corrélations significatives au niveau p<0.05 sont mis en gras.</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 11 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques et biologiques (échantillons d’avril, n=11). Les corrélations significatives au niveau p<0.05 sont mis en gras.</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 12 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques et biologiques (échantillons de juin, n=11). Les corrélations significatives au niveau p<0.05 sont mis en gras.</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 13 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques et biologiques (échantillons d’août, n=11). Les corrélations significatives au niveau p<0.05 sont mis en gras.....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 14 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques et biologiques (échantillons d’octobre, n=11). Les corrélations significatives au niveau p<0.05 sont mis en gras.....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 15 : statistiques descriptives des teneurs en COT et CO_{stable} observées du jeu de données utilisé pour la calibration des modèles d’estimation de ces teneurs sur base de l’analyse spectrométrie infrarouge (SPIR).</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 16 : Estimation du COT et CO_{stable} d’après l’analyse spectroscopique (SPIR, laboratoire de Tinlot) : résultats des validations croisées pour les modèles montrant les meilleurs résultats en terme de pouvoir prédictif.</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 17 : Descriptifs des données de teneurs en COT utilisées pour la production de statistiques et cartes dans le cadre de l’EEW2016. (n : nombre de données utilisées après soustraction des sites hors des limites wallonnes ou mal géoréférencés, et des sites localisés dans des zones non couvertes par l’ensemble des couches de co-variables utilisées pour la cartographie).</i>	<i>66</i>

<i>Tableau 18 : Comparatif des occupations de sols observées des sites de la base de données AardeWerk pour la période 1949-1972 face aux occupations de sols actuelles dérivées de la COSW (couche raster de 90mx90m utilisée dans cette étude).....</i>	<i>67</i>
<i>Tableau 19 : Statistiques descriptives des teneurs en COT (% C ; horizon de surface e) des sols sous cultures pour la période 1949-1972 (source : Aardewerk – mise à jour du PCNSW).</i>	<i>68</i>
<i>Tableau 20 : Statistiques descriptives des teneurs en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous prairies pour la période 1949-1972 (source : Aardewerk – mise à jour du PCNSW).</i>	<i>69</i>
<i>Tableau 21 : Statistiques descriptives des teneurs en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous forêts pour la période 1949-1972 (source : Aardewerk – mise à jour du PCNSW).....</i>	<i>69</i>
<i>Tableau 22 : Statistiques descriptives des teneurs en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous cultures pour la période 2004-2014 (source : REQUASUD – licence A09/2016).....</i>	<i>70</i>
<i>Tableau 23 : Statistiques descriptives des teneurs en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous prairies pour la période 2004-2014 (source : REQUASUD – licence A09/2016).</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 24 : Statistiques descriptives des teneurs en COT (% C ; 0-20cm) des sols sous forêts pour la période 2004-2014 (source : IPRFW).</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 25 : Différences moyennes observées en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous cultures entre les périodes 1949-1972 et 2004-2014, et niveau de significativité statistique de ces différences (sources : Aardewerk – mise à jour du PCNSW, REQUASUD – licence A09/2016).</i>	<i>72</i>
<i>Tableau 26 : Différences moyennes observées en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous prairies entre les périodes 1949-1972 et 2004-2014, et niveau de significativité statistique de ces différences (sources : Aardewerk – mise à jour du PCNSW, REQUASUD – licence A09/2016).</i>	<i>72</i>

Introduction

La qualité du sol peut être définie comme « l'aptitude du sol à remplir ses fonctions écologiques, économiques, sociales, scientifiques et culturelles au sein d'un écosystème naturel ou aménagé » (définition proposée dans le cadre de la révision du décret du 5 décembre 2008 relatif à la gestion des sols). Le sol étant une ressource non renouvelable à l'échelle de vie humaine, et soumis à de nombreuses pressions, il est indispensable de développer des outils pour évaluer sa qualité et les variations induites par des changements environnementaux (p.ex. changement climatique) et/ou anthropiques (p.ex. choix de gestion). Dans ce contexte, des indicateurs physico-chimiques sont mesurés dans le cadre de réseaux de surveillance, comme le carbone organique du sol (COT) mesuré dans les cultures et prairies de Wallonie du réseau CARBIOSOL. Le COT est un indicateur important, associé à différents processus physiques, chimiques et biologiques du sol. Cependant, la dynamique du COT est lente et ces changements ne sont détectables qu'après plusieurs années ou décennies. La séparation du COT en deux fractions (fraction labile, associée aux particules supérieures à 20 microns, et fraction stable, associée aux particules inférieures à 20 microns) aide à démêler les tendances à long terme dans la stabilisation de la matière organique dans le sol (fraction stable) des processus liés à la minéralisation de la matière organique et au taux de renouvellement des nutriments (fraction labile). La fraction stable a un taux de renouvellement supérieur à 100 ans, tandis que la fraction labile a une dynamique plus rapide (années ou décennies).

La mesure d'indicateurs biologiques, liés directement aux organismes du sol ou à leur activité, permet de détailler différents aspects de la qualité du sol. En effet, ils donnent des informations complémentaires sur différentes fonctions du sol (respiration potentielle – activité des micro-organismes, biomasse microbienne – transformation de la matière organique, minéralisation nette de l'azote – nutrition des plantes, diversité fonctionnelle des bactéries – diversité métabolique, vers de terre – structuration du sol, quotient microbien – qualité du carbone disponible, quotient métabolique – indicateur de stress). Certains indicateurs biologiques pouvaient ainsi être liés à la fraction labile du carbone, i.e. la fraction active. De plus, les indicateurs biologiques sont plus sensibles aux perturbations ; leur mesure permet ainsi de détecter plus rapidement des modifications de la qualité du sol. Il apparaît donc indispensable d'allier la mesure d'indicateurs physico-chimiques, en particulier les fractions de carbone organique du sol, aux indicateurs biologiques de la qualité du sol.

Variabilité saisonnière des indicateurs biologiques

L'interprétation des indicateurs biologiques nécessite des valeurs de référence auxquelles les mesures peuvent être comparées. Comme le concept de la qualité du sol est complexe, la définition de valeurs optimales est impossible dans un contexte général (Gonzalez-Quiñones et al., 2011). La définition d'un état 'normal' d'un sol présente un compromis entre les possibilités de mesures et les objectifs des réseaux de surveillance telle que l'évaluation de l'effet de différentes pratiques de gestion, l'observation de tendances à long terme et la communication des résultats. L'état 'normal' décrit les limites de fonctions pertinentes, mesurées par les indicateurs biologiques, sous les conditions climatiques et les influences anthropogéniques habituelles.

Les fluctuations des conditions environnementales influencent la dynamique et l'activité des organismes du sol, et donc son fonctionnement (Smit et al., 2001). Ces fluctuations peuvent être liées à des cycles annuels (longueur des jours, conditions météorologiques, etc.) ou des perturbations, souvent dues à l'activité humaine (travail du sol, amendement, etc.). Les mesures de gestion sont elles-

mêmes appliquées selon un calendrier : le moment auquel elles sont effectuées dépend des cultures et des conditions météorologiques. Des connaissances sur l'amplitude de la réaction des indicateurs biologiques aux changements environnementaux sont cruciales pour un réseau de surveillance des sols. Elles permettent d'identifier le moment optimal pour les campagnes de terrain et elles sont essentielles dans la comparaison de données provenant de différentes campagnes de terrain. L'effet de perturbations ou de conditions défavorables aux organismes du sol peut masquer les caractéristiques propres au sol. Pour que les données récoltées dans un réseau de surveillance soient représentatives et pertinentes pour l'identification des tendances à long terme, un échantillonnage effectué juste après une perturbation ou pendant des conditions défavorables n'est donc pas conseillé. Les indicateurs faunistiques sont généralement considérés comme plus variables que les indicateurs microbiologiques. Par exemple le nombre de vers de terre, seul indicateur faunistique mesuré dans le projet CARBIOSOL, ne peut être correctement évalué lorsque le sol devient trop sec car les vers de terre descendent plus en profondeur (Curry, 2004), ce qui rend leur extraction avec solution de moutarde impossible. Le pouvoir discriminatoire de l'indicateur diminue alors. L'activité et l'abondance des bactéries et des champignons sont également réduites pendant les périodes d'extrême froid ou de sécheresse.

L'étude des gammes de valeurs des indicateurs biologiques à l'échelle régionale, d'abord au niveau de deux unités agricoles distinguées (une unité agricole étant une surface homogène en terme de type sol – texture et drainage, utilisation de sol et région agricole) (CARBIOSOL1, Krüger et al. in press), puis sur des sols agricoles à travers la Wallonie (CARBIOSOL2), a permis d'étudier la variation spatiale et de fournir des premières gammes de valeurs des indicateurs biologiques pour les sols agricoles wallons. La variabilité saisonnière n'avait pas été prise en compte. Toutefois, la variation saisonnière est à prendre en considération lors de la définition de gammes 'normales' dans lesquelles fluctuent les mesures d'indicateurs biologiques. 'Normal' est défini dans un réseau de surveillance par les choix pris pendant sa mise en place. Dans un premier temps, les sites sélectionnés sont déclarés comme 'normal' à une certaine échelle spatiale en relation avec le type de sol et son utilisation (ou l'intention d'utilisation). Les critères de sélection de sites d'un réseau de surveillance ne tiennent donc pas compte de leurs qualités présumées. Dans un second temps, l'approche mathématique choisie influence la gamme définie comme l'état 'normal' d'un sol. Les approches, tel que l'utilisation du premier quantile et du troisième quantile (Cluzeau et al., 2012) ou d'ellipses de confiance de 95% (Pereira e Silva et al., 2013), excluent les valeurs extrêmes du jeu de données.

Dans CARBIOSOL, les gammes de valeur ont été définies par la médiane, les quantiles et les valeurs minimales et maximales. Les deux gammes ainsi définies (50% des valeurs les plus proches de la médiane et toutes les valeurs mesurées en cours du projet) peuvent être pertinentes quelle que soit la question posée. Les gammes de valeurs peuvent être présentées de différentes façons, mathématiques et/ou graphiques. Un plot radar, comme utilisé dans CARBIOSOL, permet la synthèse graphique d'un certain nombre d'indicateurs biologiques et peut être utilisé pour la communication des données aux agriculteurs. Des méthodes mathématiques permettent la synthèse de plusieurs indicateurs biologiques en une seule valeur (voir score compréhensif, CARBIOSOL1). Le concept de 'Normal Operating Range' (NOR) et de 'Normalized Ecosystem Strain' (NES) (Kersting, 1984 ; Pereira e Silva, 2013) permet de résumer plusieurs indicateurs biologiques comme ellipsoïde de confiance (95%) de n dimensions (n étant le nombre d'indicateurs considérés). La déviation de l'état 'normal' est calculée comme la distance euclidienne de cet ellipsoïde. Cette méthode de calcul permet, entre autres, d'évaluer l'effet de différentes pratiques de gestion sur le sol.

Pratiques de gestion

L'agriculture est l'ensemble des travaux dont le sol fait l'objet en vue d'une production végétale. Issue de l'agriculture traditionnelle, la gestion dite 'conventionnelle' est la forme d'agriculture la plus commune en Wallonie. Dépendamment des conditions pédo-climatiques locales, le sol est géré en utilisant des variétés de semences, des engrais et des produits phytopharmaceutiques autorisés par la loi en vigueur. Le sol est régulièrement travaillé. Des pratiques de gestion du sol alternatives existent, notamment l'agriculture de conservation et l'agriculture biologique, et sont présumées plus favorables à la qualité biologique des sols que l'agriculture conventionnelle. Les aspects de la qualité biologique des sols potentiellement affectés incluent l'érodibilité, la capacité d'infiltration de l'eau, l'activité et la diversité biologique et les stocks de carbone organique.

Objectifs

Les objectifs généraux du projet CARBIOSOL 3 sont :

- de proposer des indicateurs biologiques pertinents pour évaluer la qualité du sol en Wallonie;
- d'établir des gammes de valeurs de référence associées (NOR : Normal Operating Ranges) ;
- de mettre à disposition des utilisateurs des outils en adéquation avec leurs besoins.

Le présent rapport est divisé en six parties (notées 1 à 6). Elles reprennent dans l'ordre les six étapes du programme de travail validé en janvier 2016 par le Comité d'Accompagnement du projet CARBIOSOL 3, ainsi qu'une partie supplémentaire consacrée au travail effectué dans le cadre de l'EEW2016 (Etat de l'Environnement Wallon 2016).

1. Prise de contacts nationaux/internationaux

1.1. Matériels et méthodes

En début de l'année 2016, des scientifiques qui travaillent dans sur les réseaux de surveillance de la qualité biologique du sol de pays voisins (Jaap Bloem, Pays-Bas ; Anneke Beylich, Allemagne ; Guénola Pérès, France ; Anna Hug, Suisse) ont été contactés pour en début d'année 2016 afin de partager leurs expériences et de présenter leurs réseaux de surveillance.

Deux évènements ont été organisés en coopération avec nos collègues flamands, Bruno de Vos (SBIC, INBO) et Petra Deproost (ALBON, LNE)), pour discuter de l'utilisation des indicateurs biologiques dans les réseaux de surveillance.

Dans un premier temps, une discussion technique a été menée lors d'une réunion à distance par Google Hangout (le 19 avril 2016). Cette discussion avait pour but d'aborder les choix méthodologiques faits dans les différents réseaux de surveillance de la qualité biologique du sol dans les pays européens et des possibles problèmes y afférents. Spécifiquement, la discussion a été organisée en différentes sections: introduction, méthodologie générale, échantillonnage, pré-incubation et mesures, traitements de données et communication.

Dans un deuxième temps, une journée d'étude, a été organisée le 15 septembre 2016 à Bruxelles avec les mêmes spécialistes internationaux. Cette journée d'étude était accessible à tous les scientifiques intéressés. Pendant la session du matin, les spécialistes cités plus haut ont présenté les réseaux de surveillance dans lesquels ils travaillent. La session de l'après-midi était consacrée à la discussion des enjeux et des perspectives de l'utilisation des indicateurs biologiques dans les réseaux de surveillance de la qualité biologique du sol belges. Différents groupes (d'environ 6 personnes) ont ainsi indépendamment discuté et réfléchi aux questions « W » (What, Who, Where, When, Why et hoW), avant de présenter les résultats de leur réflexion à l'ensemble des participants.

1.2. Résultats et discussions

Discussion technique

Les méthodes utilisées diffèrent entre pays. La volonté et la possibilité d'unifier les méthodes utilisées à travers les frontières sont faibles. Effectivement, la priorité d'un réseau de surveillance est la comparaison de valeurs avec des mesures précédentes. L'évolution des technologies et les changements dans les priorités de recherches peuvent tout de même rendre une adaptation des méthodes nécessaires.

Dans les pays limitrophes, les échantillons sont généralement collectés en printemps ou en automne. Dans un climat atlantique, les conditions météorologiques sont alors considérées favorables pour l'échantillonnage du sol en ce qui concerne la température (10-15°C étant les températures optimales pour la macro faune du sol (Curry, 2004)) et l'humidité du sol (ni proche du point de flétrissement permanent, ni sol saturé en eau). En printemps, l'échantillonnage est effectué avant que les agriculteurs effectuent des amendements (fertilisation etc.) et avant que la croissance des cultures n'encombre l'accès aux sites. L'effet de la culture actuelle ou précédente n'est pris en compte dans

aucun des réseaux de surveillance étudiés. Les mesures de gestion sont présumées avoir plus d'influence sur les indicateurs biologiques que les plantes elles-mêmes.

Les échantillons de sol sont pré-incubés pour les mesures microbiologiques dans les pays limitrophes afin de réduire l'effet des conditions météorologiques précédant l'échantillonnage. Les avantages d'une pré-incubation sont vus de manière critique, comme la variabilité de beaucoup d'indicateurs biologiques est supérieure à 50% entre différents temps d'échantillonnage.

Dans tous les réseaux de surveillance, les données sont communiquées aux administrations et présentées en accord avec les demandes. La France est le seul pays où le public a accès aux données via un site web (<https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/index.php>). En général, le potentiel d'améliorer la communication des données existe dans tous les pays.

Journée d'étude

Le workshop international de septembre 2016 a attiré 38 participants. Lors des discussions sur les indicateurs biologiques plusieurs points ont été mis en avant :

- L'établissement des gammes de valeurs doit se faire progressivement en fonction des moyens disponibles. Dans un premier temps, une stratification par utilisation des sols (cultures, forêt, prairie) et par type de sol est conseillée. Les données peuvent ensuite être complétées.
- En forêt, il convient de mesurer l'horizon organique et l'horizon minéral séparément.
- Idéalement, une seule équipe est responsable pour l'échantillonnage et l'analyse est confiée à plusieurs laboratoires spécialisés.
- La gestion de la base de données doit être considérée.
- Lors de l'échantillonnage, les périodes de chaleurs, sécheresse et froid extrême doivent être évitées.
- L'utilisation des indicateurs biologiques s'avère intéressante comme système d'alerte précoce lors d'un suivi à long terme de la qualité des sols et comme outils pour évaluer l'effet de différentes gestions.

Un résumé en anglais des principaux points de discussion réalisé par les organisateurs avec des contributions des participants du workshop est disponible en Annexe 1.

2. Journée d'étude sur la qualité biologique des sols agricoles

- **Organisation d'une demi-journée thématique sur 'L'activité biologique des sols en agriculture'**

La demi-journée thématique portant sur 'L'activité biologique des sols en agriculture' a eu lieu le 8 mars 2016 au Golf Club de La Bruyère à Villers-la-Ville. Cette demi-journée d'étude, organisée en partenariat avec l'asbl Greenotec, a attiré plus de 120 personnes dont de nombreux agriculteurs. Le programme incluait quatre présentations (Annexe 2).

La présentation du projet CARBIOSOL a reçu un feedback très positif. De nombreux agriculteurs ont exprimé leur intérêt pour le projet lors de discussions suivant les présentations. Au total, 33 agriculteurs ont rempli un questionnaire concernant leurs pratiques de gestion et leur intérêt pour le projet, et donné leur accord pour que nous puissions échantillonner sur leurs parcelles au cours du projet. Nous avons également reçu, suite à cet événement, des propositions émanant de l'asbl Regenacterre et du Parc Naturel des Plaines de l'Escaut. Un article de presse relatif à cette demi-journée d'étude est paru dans Le Sillon Belge du 15/04/2016 (Annexe 3).

- **Inventaire des pratiques de conservation du sol**

Un inventaire des pratiques de conservation et d'amélioration des sols appliquées par les agriculteurs en Wallonie a été réalisé grâce à un questionnaire proposé lors de la demi-journée d'étude organisée en partenariat avec Greenotec. Trente-trois agriculteurs présents à la demi-journée y ont répondu. Les exploitations de ces 33 agriculteurs sont majoritairement localisées en région Limoneuse (21/33), mais également en Région Sablo-Limoneuse (6/33), en Condroz (5/33) et Famenne (1/33) (Figure 1).

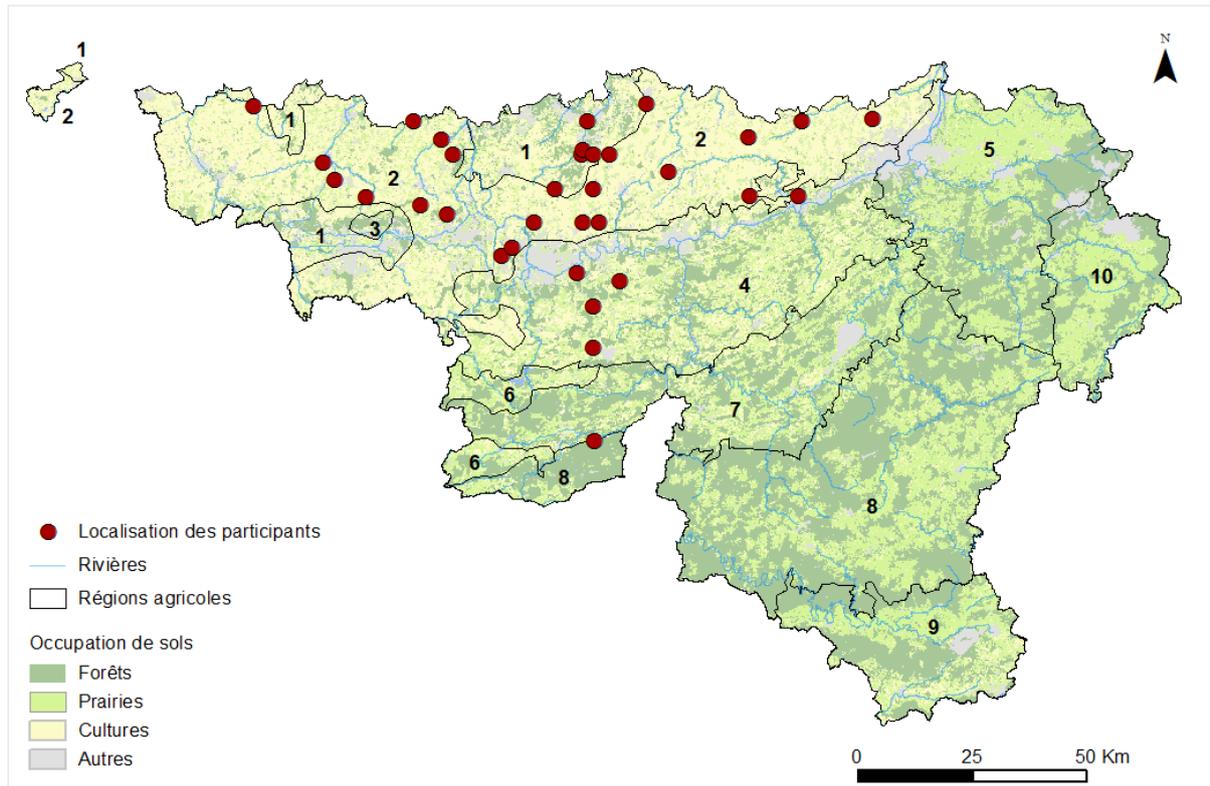


Figure 1 : Localisation au sein des différentes régions agricoles des exploitations des 33 participants ayant répondu au questionnaire concernant les pratiques de conservation et d'amélioration du sol. Les régions agricoles - 1. Sablo-Limoneuse, 2. Limoneuse, 3. Campine Hennuyère, 4. Condroz, 5. Herbagère Liège, 6. Herbagère Fagnes, 7. Famenne, 8. Ardenne, 9. Jurassique et 10. Haute Ardenne (<http://geoportail.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/geoportail/contents/metadata/plainData/6f562464-f478-4f41-99a7-ed28d0cdbe7c.html>) - superposée à la carte simplifiée d'occupation des sols (basée sur la COSW ; <http://cartopro3.wallonie.be/>).

Des sept catégories de pratiques agricoles de conservation identifiées comme pratiquées en Wallonie (C. Roisin, communication orale), les cultures intermédiaires sont les plus fréquemment appliquées par les participants (27 mentions) (Tableau 1). Concernant les pratiques agricoles autres que celles proposées dans le Tableau 1, on trouve : le labour avec non labour occasionnel (deux fois), décompactage quand nécessaire, épandage de matière organique (fumier de poulet, lisier de porc), labour ou non-labour selon conditions climatiques et/ou culturales, et cultures maraichères. Quatre des participants pratiquent l'agriculture biologique. Pour finir, ces exploitants agricoles appliquent de 1 à 6 différentes pratiques de conservation et d'amélioration des sols, avec une médiane de 3 pratiques (Figure 2).

Tableau 1 : Pratiques d'agriculture de conservation appliquées par les agriculteurs ayant participé à un questionnaire lors de la demi-journée d'étude (nombre de participants : 33).

Pratique d'agriculture de conservation	Nombre de mentions
Cultures intermédiaires	27 / 33
Bandes enherbées	15 / 33
Non-labour avec labour occasionnel	13 / 33
Non-labour permanent – Décompactage (25-30 cm)	12 / 33
Non-labour permanent – Travail superficiel (10 cm)	10 / 33
Agroforesterie	3 / 33
Haies en cultures	4 / 33

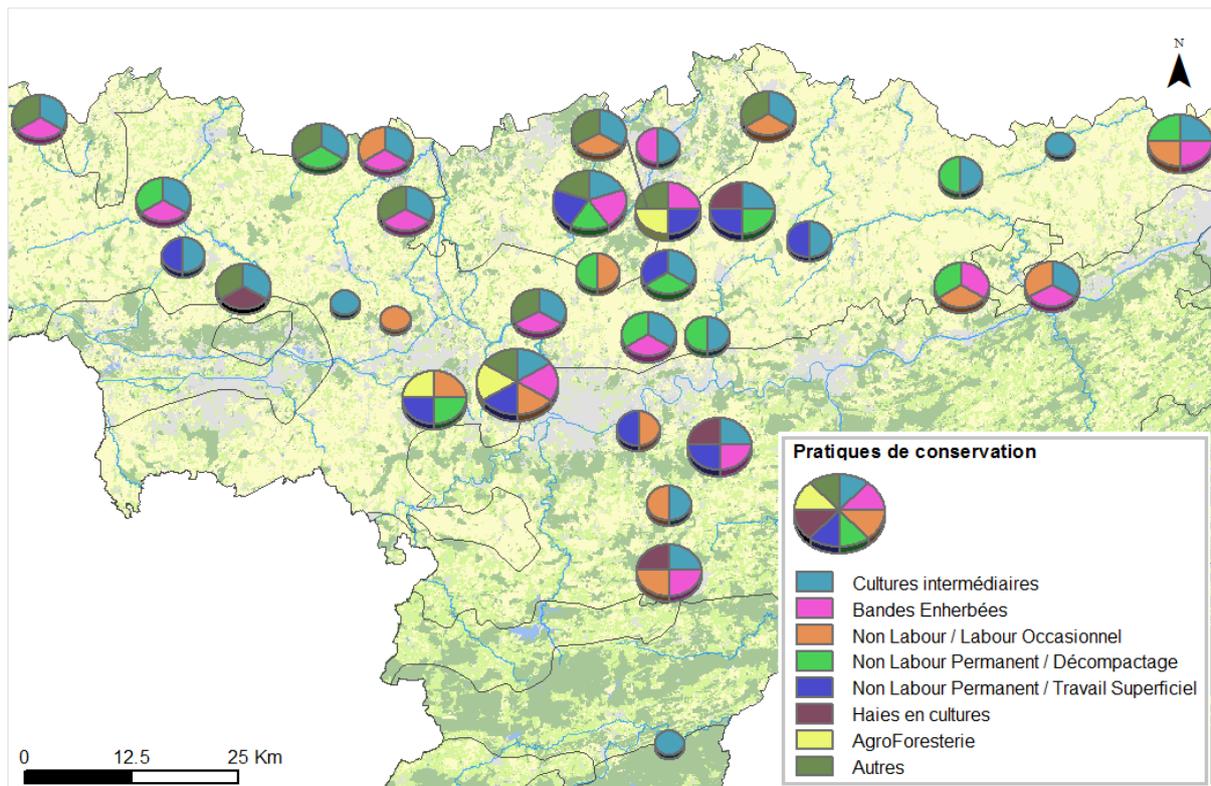


Figure 2 : Carte synthétique des pratiques de conservation et d'amélioration du sol appliquées au sein des exploitations agricoles des 33 agriculteurs ayant répondu au questionnaire proposé lors de la demi-journée d'étude que la qualité biologique des sols en 2016

3. Mesure de la variabilité saisonnière des indicateurs biologiques

3.1. Matériels et méthodes

Choix des sites

Les sites échantillonnés ont été choisis suite à des entretiens téléphoniques ou en personne avec les agriculteurs ayant exprimé un intérêt lors de la journée d'étude sur la qualité biologique des sols agricoles (cf. §2). Les critères de sélection étaient que (1) la parcelle soit sous agriculture conventionnelle, (2) la culture actuelle soit le froment d'hiver, (3) la culture précédente soit la betterave, (4) le site puisse servir comme témoin dans une possible future étude sur l'effet de la pratique de gestion. En tout, six parcelles sous agriculture conventionnelle ont été sélectionnées chez les 33 agriculteurs interrogés. Une 7ème parcelle a été sélectionnée au sein de l'essai à long-terme du CRA-W à Longtours. Quatre sites supplémentaires sous autres pratiques de gestion ont été sélectionnés (voir ci-dessous) afin de collecter des premiers résultats sur la qualité biologique du sol et de la saisonnalité : un site récemment converti à l'agriculture biologique, un site avec restitution des pailles + CIPAN de l'essai à long terme du CRA-W à Longtours, et deux sites gérés par l'ASBL Régénacterre (un site en semis direct et un site en TCS Claydon).

L'ensemble des 11 sites forment un gradient ouest-est à travers le nord de la Wallonie, incluant principalement la Région Limoneuse, mais également la Région Sablo-Limoneuse et le Condroz (Figure 1). Le Tableau 2 présente les informations de gestion, d'appartenance à une région agricole, ainsi que le DER (District de l'Espace Rural) et le sigle pédologique issu de la CNSW (<http://geoportail.wallonie.be>), pour chaque site.

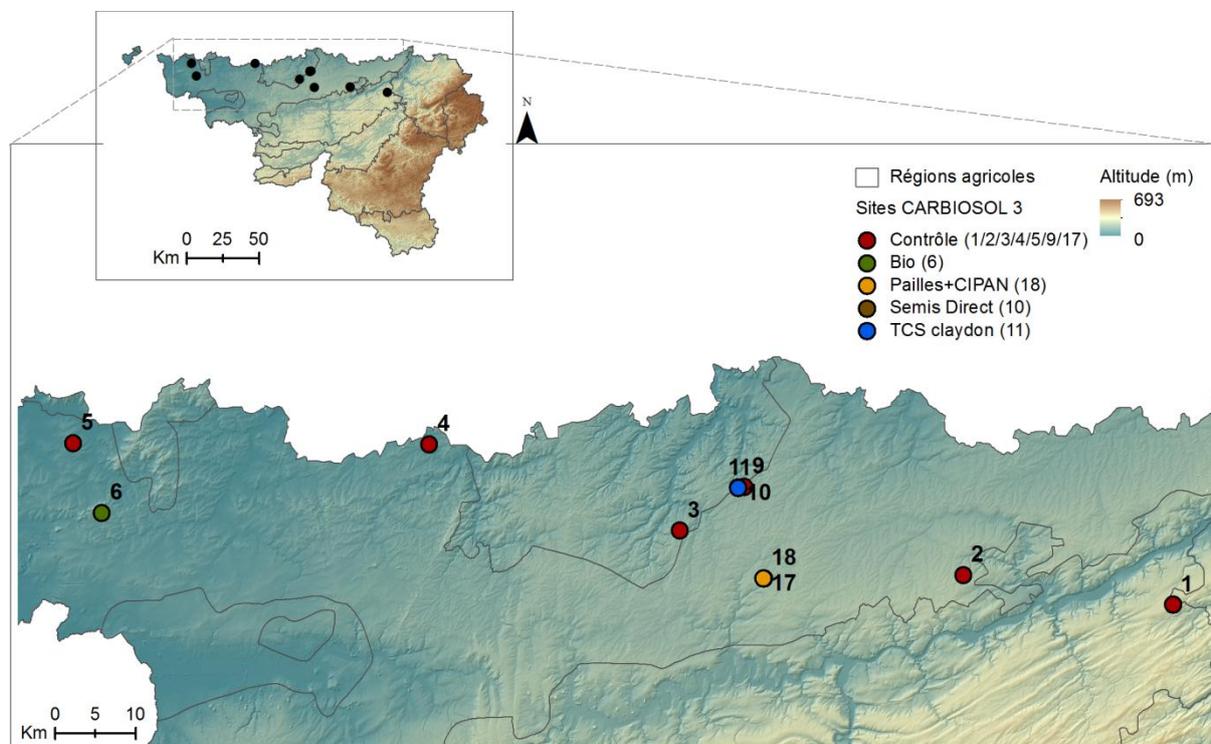


Figure 3 : Location des 11 sites sélectionnés pour étudier la variabilité saisonnière des indicateurs biologiques. (Les sites 10 et 17 sont localisés par leur référence, les points étant trop proches d'autres pour être visibles à cette échelle).

Tableau 2 : Eléments descriptifs des sites échantillonnés (gestion, région agricole, DER et sigle pédologique)

Site	Gestion	Région Agricole	DER*	Sigle pédologique**
1	Conventionnelle	Condroz	sols limono-caillouteux ou limoneux de l'Ardenne Condrusienne	ADa1
2		Limoneuse	sols limoneux dominants des bas-plateaux de la Hesbaye occidentale	ADa1
3		Sablo-Limoneuse	sols limoneux dominants des bas-plateaux de la Hesbaye occidentale	Aba(b)1
4		Limoneuse	sols limoneux, sablo-limoneux ou argileux des bas-plateaux nord-hennuyers ... - cours aval de la Dendre et de la Senne	Aba(b)1
5		Limoneuse	sols argileux, sablo-limoneux ou limoneux des bas-reliefs de l'Escaut et de la Lys (rive gauche)	Ldc1
9		Limoneuse	sols limoneux dominants des bas-plateaux de la Hesbaye occidentale	Aba1
17		Limoneuse	sols limoneux dominants des bas-plateaux de la Hesbaye occidentale	Aba(b)1
18		Restitution pailles & CIPAN	Limoneuse	sols limoneux dominants des bas-plateaux de la Hesbaye occidentale
10	Semis Direct	Sablo-Limoneuse	sols limoneux dominants des bas-plateaux de la Hesbaye occidentale	Aba1
11	TCS Claydon	Sablo-Limoneuse	sols limoneux dominants des bas-plateaux de la Hesbaye occidentale	Aba1
6	Bio (labour occasionnel)	Limoneuse	sols limoneux, sablo-limoneux ou argileux des bas-plateaux nord-hennuyers ... - cours amont de la Dendre et de la Senne	Ada0

* District de l'Espace Rural

** Carte Numérique des Sols Wallons

Pratiques de gestion

Agriculture biologique

L'agriculture biologique désigne une agriculture qui n'a pas recours aux produits de synthèse chimique, aux organismes génétiquement modifiés (OGM) et à l'irradiation. L'appellation est légalement protégée et nécessite une certification. Le Site 6 a été converti en 2015 (première année de gestion biologique) et n'est pas encore certifié. L'échantillonnage de 2016 reflète donc un premier point après conversion et permettrait de suivre l'évolution d'une parcelle après la transition vers l'agriculture biologique.

Semis direct

Le semis direct est une forme de gestion de l'agriculture de conservation. Les graines sont semées sans pratiquer de travail du sol (qui engendre une perturbation physique importante pour les organismes du sol). Avec la rotation des cultures et les cultures intermédiaires, le semis direct est un des principaux piliers de l'agriculture de conservation.

Pailles & CIPAN

En Wallonie, les CIPAN (Cultures Intermédiaires Pièges A Nitrates) sont une des mesures du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA). Elles sont obligatoires (1) si un apport de matière organique est réalisé entre le 1^{er} juillet et le 15 septembre, (2) sur les parcelles en pente, (3) en zone vulnérable, sur 90% de la surface des cultures récoltées ou après une culture de légumineuse. En général, les CIPAN doivent être semées avant le 15 septembre ; elles peuvent être détruites après une période de temps définie en fonction de la situation. Le site 18 est géré ainsi depuis 1959.

TCS Claydon

Les TCS (Techniques Culturelles Simplifiées) désignent des pratiques de gestion qui limitent le travail du sol. Claydon est une technologie brevetée qui permet d'effectuer toutes les étapes de semi (semencier, aérer, puis refermer le sol) en un seul passage de tracteur.

Prélèvements sur le terrain

Chaque parcelle a été échantillonnée à quatre reprises au cours de la période de végétation afin d'étudier la variabilité saisonnière, en avril (échantillonnage après première période douce de l'année), juin (floraison du froment), août (après la moisson) et octobre (cultures intermédiaires ou sol nu).

Sur chaque parcelle, un carré de 10 m de côté a été délimité et géoréférencé par GPS lors de la première campagne afin d'éviter des erreurs de relocalisation lors des campagnes suivantes. Un échantillon de sol a été prélevé à chaque angle du carré selon la méthode d'échantillonnage établie dans le réseau CARBIOSOL (Figure 4). Ainsi, un échantillon « composite » (ou échantillon moyen) a été créé directement sur le terrain à partir de cinq sous-échantillons prélevés dans un cercle de 4m de rayon (site d'environ 50 m²) centré sur l'angle du carré (Figure 4). Les sous-échantillons ont été prélevés selon une distance croissante régulière par rapport au centre du cercle (à 0.8, 1.6, 2.4, 3.2 et 4.0 m), et tournant de 90° dans le sens horaire avant chaque prélèvement. Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'une tarière à main sur toute la profondeur de l'horizon de labour (Ap) (Figure 4). La profondeur de labour a été déterminée par observation, et est considérée comme constante au niveau de chaque site. Des échantillons supplémentaires ont été prélevés sur la profondeur 0-10 cm afin d'analyser les indicateurs biologiques de la qualité du sol (Cf. § suivant).

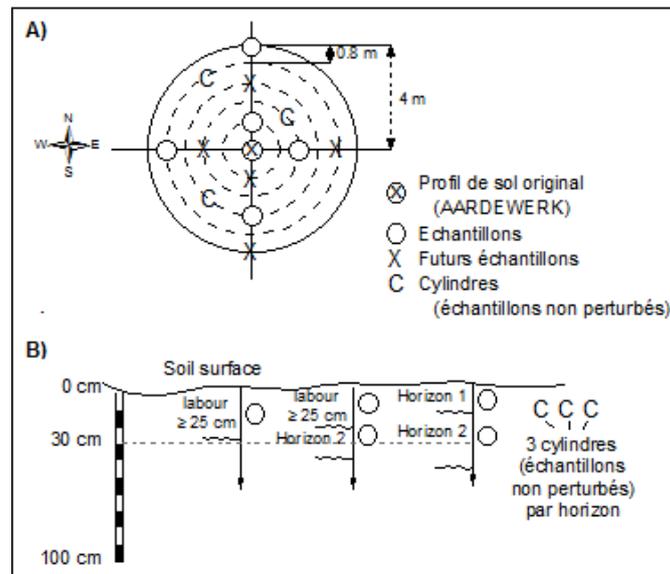


Figure 4 : Schéma méthodologique d'échantillonnage des sols valable pour le réseau CARBOSOL et son complément CARBIOSOL.

Acquisition de valeurs pour les indicateurs chimiques

Analyse Carbone

Les échantillons prélevés ont été séchés à l'air libre, délicatement broyés, et tamisés à 2mm, permettant ainsi la détermination de la teneur en éléments grossiers (EG ; $\varnothing > 2\text{mm}$). La présence de carbonates dans les échantillons, et donc de carbone inorganique (CI), a été testée par l'application de HCl (5%). Les échantillons testés positifs ont été ensuite analysés pour déterminer leur teneur en carbone inorganique par calcimétrie avec capteur électronique de pression (Sherrod *et al.*, 2002). La teneur en carbone totale (CT) de tous les échantillons a été déterminée par analyse élémentaire (VarioMax CN dry combustion Analyzer, Elementar GmbH, Germany). Pour finir, la teneur en carbone organique total (COT) a été déduite ainsi (eq. 1) :

$$COT = CT - CI \quad (1)$$

Avec : COT la teneur en carbone organique total (g C kg^{-1}), CT la teneur en carbone total (g C kg^{-1}) et CI la teneur en carbone inorganique (g C kg^{-1}).

pH

Le pH a été mesuré dans une suspension (1 : 1 m : v) de 1M KCl et dans de l'eau distillée à l'aide d'un pH-mètre (HI2550 HANNA instruments).

Carbone et azote extrait à l'eau

Le carbone organique peut être divisé en divers fractions qui ont des temps de renouvellement hétérogènes, décrit dans la littérature entre moins de 1 et 6000 ans (Knorr *et al.* 2005). Les composants carbonés avec des masses moléculaires faibles sont réutilisés très rapidement (environ 4000 fois par

ans) (Boddy *et al.* 2007). Des extractions à l'eau froide (30°C) et à l'eau chaude (80°C) permettent une extraction directe des fractions labiles du carbone organique du sol. Le carbone extrait à l'eau froide présente le carbone immédiatement accessible aux micro-organismes et par conséquent, leur source d'énergie principale (Haynes, 2000). Le carbone extrait à l'eau chaude est lié à l'activité microbienne et a été proposé comme proxy pour la biomasse microbienne (Sparling *et al.* 1998). Le carbone extrait à l'eau chaude est sensible à l'utilisation du sol et peut être un indicateur intégratif de la qualité biologique (Ghani *et al.* 2003).

Le carbone et l'azote labile ont été déterminés par extraction consécutive à l'eau froide (30°C) et à l'eau chaude (80°C) (Ghani *et al.*, 2003). 5 g de sol frais ont été pesés dans un tube à centrifuger avec 30 ml d'eau distillée. Les échantillons sont agités pendant 30 minutes (120 rpm) et centrifugés pendant 15 minutes à 3000 rev min⁻¹. Le surnageant est filtré par des filtres en membranes de 0.45 µm (GN-6 Metrical®, Pall Corporation, US). 30 ml d'eau distillée sont ajoutés au tube. L'échantillon est agité (30 minutes à 120 rpm) puis incubé à 80°C pendant 16 heures. Après l'incubation, l'extrait d'eau chaude est agité, centrifugé et filtré de manière analogue à l'eau froide.

L'azote total dans l'extrait est mesuré par colorimétrie avec un auto-analysateur muni d'un digesteur UV (Auto-Analyzer 3, Bran + Luebbe, Allemagne). Le carbone organique total de l'extrait est mesuré avec un système d'analyse par infrarouge (LABTOC, Pollution & Process Monitoring, Grande Bretagne).

Acquisition de valeurs pour les indicateurs biologiques

Echantillonnage et préparation des échantillons de sol pour les analyses d'indicateurs biologiques

Pour l'analyse des indicateurs biologiques, le sol a été échantillonné à une profondeur de 0 à 10 cm. Les échantillons de sols ont été tamisés à 4 mm pour être homogénéisés, les racines et pierres ont été retirées (Horwarth & Paul, 1994). Jusqu'aux analyses, les échantillons ont été conservés dans une chambre froide à 4°C.

La teneur en eau a été mesurée comme différence en masse de 5 g de sol avant et après un passage 24 heures dans une étuve à 105°C. La capacité au champ a été mesurée en suivant la méthode proposée par Grace *et al.* (2006) : 50 grammes de sol sont placés dans un entonnoir muni d'une fermeture dont le tube est obstrué avec de la laine de verre. Ensuite, 50 ml d'eau distillée sont ajoutés au sol dans l'entonnoir. La fraction d'eau que le sol peut retenir pendant 30 min est mesurée gravimétriquement. Les échantillons sont ajustés à une capacité au champ de 50-60% avant les mesures.

Vers de terre

Les vers de terre sont un des macro-organismes les plus importants pour le sol. Ils participent notamment à la structuration du sol et la transformation de la matière organique. Une grande abondance de vers de terre est considérée comme favorable pour la qualité des sols tempérés où les vers de terre sont indigènes.

Les vers de terre ont été échantillonnés à proximité de chaque site, en dehors du carré fixé. Un seul échantillon a été collecté par parcelle et par moment d'échantillonnage. Les vers de terre ont été extraits avec deux fois 4 l de solution de moutarde (3 et 6 g de farine de moutarde (*Sinapis Albae*

Seminis Pulvis, Pharmaflore) l⁻¹ respectivement) (Gunn, 1992; Lawrence *et al.*, 2002) sur une surface de 30*60 cm démarquée par un cadre. Tous les vers de terre sortant du sol suite au traitement ont été collectés et conservés dans 70 % d'éthanol. Les vers de terre ont été comptés et leurs masses mesurées en g de biomasse préservée dans l'éthanol.

Minéralisation de l'azote

La minéralisation nette de l'azote est la transformation de l'azote sous forme organique en azote minéral. Ce processus est important pour le bon fonctionnement du sol car les plantes ne peuvent pas accéder à l'azote organique. Une valeur élevée est donc généralement considérée comme favorable. Toutefois, une minéralisation nette de l'azote peut également indiquer un risque de lessivage du nitrate. Cela concerne particulièrement les périodes pendant lesquels les sols ne sont pas couverts de végétation.

La minéralisation de l'azote a été calculée par la différence de la teneur en azote minéral (nitrate, N-NO₃⁻ et ammonium, N-NH₄⁺) dans un extrait de 40 ml KCl (1M) avant et après une incubation de 20 g de sol frais pendant 29 jours à 25°C en absence de racines et de lessivage dans une chambre noire (Hart *et al.*, 1994). Les extraits ont été centrifugés à 3000 rev min⁻¹ pendant 10 min. Le surnageant a été congelé jusqu'à l'analyse. Les concentrations en N-NO₃⁻ et N-NH₄⁺ ont été mesurées par colorimétrie avec un auto-analysateur (Auto-Analyzer 3, Bran + Luebbe, Allemagne).

Biomasse microbienne

La biomasse microbienne est la quantité des êtres vivants dans le sol à l'exception des racines et des macro-organismes. Une biomasse élevée dans le sol peut indiquer des conditions de sol favorables pour la croissance et le métabolisme des micro-organismes.

La biomasse microbienne (carbone et azote) a été mesurée par fumigation avec du chloroforme (Vance *et al.*, 1987). Vingt grammes de sol non-fumigé et 20 g de sol fumigé (72 heures avec du chloroforme sans alcool) ont été mis en contact avec 100 ml de K₂SO₄ (0,5M). Les échantillons ont été agités pendant une heure (180 rpm) et le surnageant a été filtré (Whatman Filter Papers 42, CAT No. 1442-150). L'azote total (E_N) est mesuré par colorimétrie avec un auto-analysateur muni d'un digesteur UV (Auto-Analyzer 3, Bran + Luebbe, Allemagne). Le carbone organique total de l'extrait est mesuré avec un système d'analyse par infrarouge (LABTOC, Pollution & Process Monitoring, Grande Bretagne).

Le carbone et l'azote extrait sont convertis en biomasse en utilisant les équations (2) et (3) :

$$MBC = E_C/k_{EC} \quad (2)$$

$$MBN = E_N/k_{EN} \quad (3)$$

Où MBC et MBN sont le carbone et l'azote microbiens, E_C et E_N le carbone et l'azote extraits et k_{EC} et k_{EN} les facteurs de conversion. La valeur 0,45 (Jenkinson *et al.*, 2004) est utilisée pour le carbone et la valeur 0,54 (Joergensen & Müller, 1996) est utilisée pour l'azote.

Diversité fonctionnelle

La diversité fonctionnelle ou diversité métabolique des bactéries décrit la diversité de la fonction métabolique de la communauté microbienne. Une diversité fonctionnelle élevée est vue comme favorable : une communauté microbienne diverse s'adapte plus facilement aux changements environnementaux.

La diversité fonctionnelle ou diversité métabolique des bactéries a été mesurée avec les microplaques Ecoplates Biolog avec 31 substrats carbonés. Un gramme de sol frais a été mis en contact avec 9 ml de chlorate de sodium (Rutgers *et al.*, 2005). Pour évaluer la taille de la communauté microbienne, trois dilutions (10^{-2} , 10^{-3} et 10^{-4}) ont été réalisées dans une solution de 0,85% de NaCl. Une dilution qui correspond à 1000 à 2000 UFC (unités de formation de colonies) a été utilisée pour l'incubation. Les microplaques Biolog ont été incubées pour 72 heures à 20°C. Après l'incubation, les substrats avec des réactions visibles ont été identifiés. La diversité fonctionnelle est exprimée comme pourcentage de substrats utilisés.

Respiration du sol

La respiration du sol est une mesure pour l'activité microbienne et la vitesse de décomposition de la matière organique. Une activité microbienne élevée est favorable à la capacité d'un sol de supporter la croissance des plantes. Un taux de renouvellement rapide de carbone organique du sol peut par contre indiquer une diminution des stocks de carbone. La respiration est mesurée après 16 heures, 7 jours, 14 jours et 21 jours de pré incubation. La mesure après 16h correspond à la respiration potentielle, la respiration basale est mesurée après une pré-incubation de 7, 14 et 21 jours.

La respiration du sol a été déterminée en mesurant l'accumulation de CO₂ issu de 20 g de sol frais dans l'espace de tête d'une bouteille de 250 ml à 15°C. Des échantillons de gaz de 4 ml ont été pris à 0, 120, 240 et 360 minutes d'incubation et la concentration de CO₂ a été analysée par absorption infrarouge (EGM-4, PPsystem, UK). La vitesse de production de CO₂ a été calculée à partir de régression linéaire.

Le quotient microbien

Le quotient microbien est un indice de la disponibilité de carbone pour les micro-organismes. Un quotient microbien élevé est considéré comme favorable. Le quotient microbien est le rapport entre la quantité de carbone microbien (C_{mic} en g C kg⁻¹) et la quantité totale de carbone organique (COT en g C kg⁻¹; Eq. 4) :

$$\text{Quotient microbien} = \frac{C_{mic}}{COT} \quad (4)$$

Le quotient métabolique

Le quotient métabolique indique l'énergie nécessaire à l'entretien d'une cellule. Des valeurs élevées peuvent indiquer que la communauté microbienne est stressée. Des valeurs faibles sont donc généralement favorables.

Le quotient métabolique est le rapport entre la respiration potentielle (C-CO₂ en g C kg⁻¹ h⁻¹) et la biomasse microbienne (C_{mic} en g C kg⁻¹) (Eq. 5) :

$$\text{Quotient métabolique} = \frac{C-CO_2}{C_{mic}} \quad (5)$$

Définition de gammes de valeurs et analyses statistiques

Plots radars

Les plots radars permettent de visualiser plusieurs indicateurs biologiques différents sur leur propre axe dans un même diagramme (Kennedy *et al.*, 1995). Les polygones caractérisent la qualité biologique à une échelle définie. Cette approche a été proposée pour évaluer la qualité biologique dans quelques pays européens, notamment en République Tchèque (Hofman *et al.*, 2003) et en France (Cluzeau, 2012).

Chaque indicateur biologique est présenté sur un axe du plot avec la valeur minimale du jeu de données entier de l'indicateur (le jeu de données inclut toutes les données mesurées au cours des projets CARBIOSOL 1, 2 et 3 sous culture et prairie) au centre et la valeur maximale du jeu de données entier à l'extrême extérieur. La surface mauve présente la gamme de valeurs entre la valeur maximale et minimale d'un sous-échantillon, la surface bleue la gamme de valeurs entre le premier et le troisième quantile et la ligne verte la médiane du sous-échantillon. Les plots radars sont réalisés dans R avec le package *fmsb* (Nakazwawa & Nakazwawa, 2014).

Normal operating ranges (NOR)

La gamme de fonctionnement normal ('Normal operating range' (NOR)) décrit les fluctuations naturelles de paramètres pertinents pour le fonctionnement d'un sol et donc de ses limites naturelles (Pereira e Silva, 2013). Différentes approches existent pour décrire ces gammes, que ce soit graphiques (voir en dessus) ou mathématiques. Le calcul d'ellipsoïde de confiance à 95% pour synthétiser plusieurs indicateurs mesurés est proposé dans la littérature (Pereira e Silva, 2013; Kersting, 1984). Etant donné la taille relativement petite de la base de données CARBIOSOL et pour des raisons de cohérence par rapport au plot radar, un ellipsoïde minimal contenant tous les points d'un jeu de données est calculé dans cette étude. Comme pour les plots radars, six indicateurs biologiques et deux quotients écosystémiques sont considérés dans le calcul de cet ellipsoïde à huit dimensions. Pour les vers de terre, la valeur mesurée est utilisée pour tous les quatre points de données de la parcelle et du moment d'échantillonnage correspondants. Les ellipsoïdes minimales sont calculés dans R avec la fonction *ellipsoidhull* du package *cluster* (Maechler *et al.*, 2014).

La pression écosystémique normalisée ('Normalized ecosystem strain' (NES)) est définie comme le rapport entre la distance euclidienne d'un point de donnée et le centre de l'ellipsoïde et la distance euclidienne entre le centre de l'ellipsoïde et la surface de l'ellipsoïde (Kersting, 1984). Une NES inférieure à 1 indique qu'un point se trouve dans l'ellipsoïde, tandis qu'une NES supérieure à 1 indique qu'un point est hors de la gamme de fonctionnement normal. Par rapport à d'autres moyens de synthèse mathématique de la qualité biologique, le calcul de la pression écosystémique normalisée présente l'avantage qu'elle peut être calculée même si seule une partie des indicateurs biologiques ne sont mesurés pour un point.

Analyses statistiques

Comme les données des indicateurs biologiques ne suivent en général pas de distribution gaussienne et afin de réduire l'influence des valeurs aberrantes extrêmes, des ANOVAs avec permutation à un facteur comme décrit dans Anderson (2001) sont calculés pour tester l'effet du moment d'échantillonnage pour les sept sites sous agriculture conventionnelle. Le site est imbriqué

dans le moment d'échantillonnage. Les calculs sont effectués dans R avec le package ImPerm (Wheeler et al., 2014). La relation entre indicateurs biologiques et indicateurs chimiques a été testée par corrélation de Pearson. L'analyse de données a été effectuée avec Excel (Microsoft Office Professionnel Plus 2013) et R 3.2.2 (R Development Core Team 2009).

Effet de pré-incubation sur la respiration

Comme les données pour la respiration ne suivent pas non plus de distribution gaussienne et afin de réduire l'influence des valeurs aberrantes extrêmes, des ANOVAs avec permutation à un facteur comme décrit dans Anderson (2001) sont calculées pour tester l'effet de la pré-incubation. Des ANOVAs avec permutation à deux facteurs sont calculées pour tester l'interaction du moment d'échantillonnage et du site pour les mesures après différents temps de pré-incubation. Les calculs sont effectués dans R avec le package ImPerm (Wheeler, 2014). Le coefficient de variation (CV) est le rapport entre l'écart type et la moyenne du sous-échantillon.

3.2. Résultats et discussion

Variabilité saisonnière des sites sous agriculture conventionnelle

Conditions météorologiques

Avec la disponibilité de substrats, les conditions météorologiques sont le facteur principal influençant la saisonnalité des indicateurs biologiques (Schloter et al., 2003). Des conditions météorologiques hors de la normale pour les températures et les précipitations ont marqué plusieurs périodes de l'année 2016. Pendant la première moitié de l'année, des précipitations excédentaires ont touché la Wallonie (625 mm de janvier à juin à Gembloux, Figure 5). Le printemps (mars, avril, mai) était plus froid que la normale (1981-2010), mais restait dans les normes. Les échantillons d'avril ont été collectés au milieu du mois (12, 14 et 20 avril), quand les températures maximales étaient entre 10 et 19°C et les températures minimales entre 1 et 9°C (Gembloux, source accuweather.com). De forts orages ont marqué le début du mois de juin. La météo était clémente lors du deuxième échantillonnage (9 et 10 juin) avec des températures minimales entre 10 et 11°C et des températures maximales entre 20 et 22°C. En juillet et août, les températures étaient en correspondance avec la normale et les précipitations légèrement déficitaires. L'échantillonnage d'août (23 et 24 août) a eu lieu sous un temps estival, avec des températures minimales de 16°C et des températures maximales jusqu'à 32°C. Le mois de septembre a été marqué par des températures très anormalement supérieures aux normales, et par des précipitations très anormalement déficitaires. Le mois d'octobre était plus froid que la normale et les précipitations restaient toujours déficitaires. Lors du dernier échantillonnage (6 et 7 octobre), les températures étaient de 2°C à 13°C et il faisait sec.

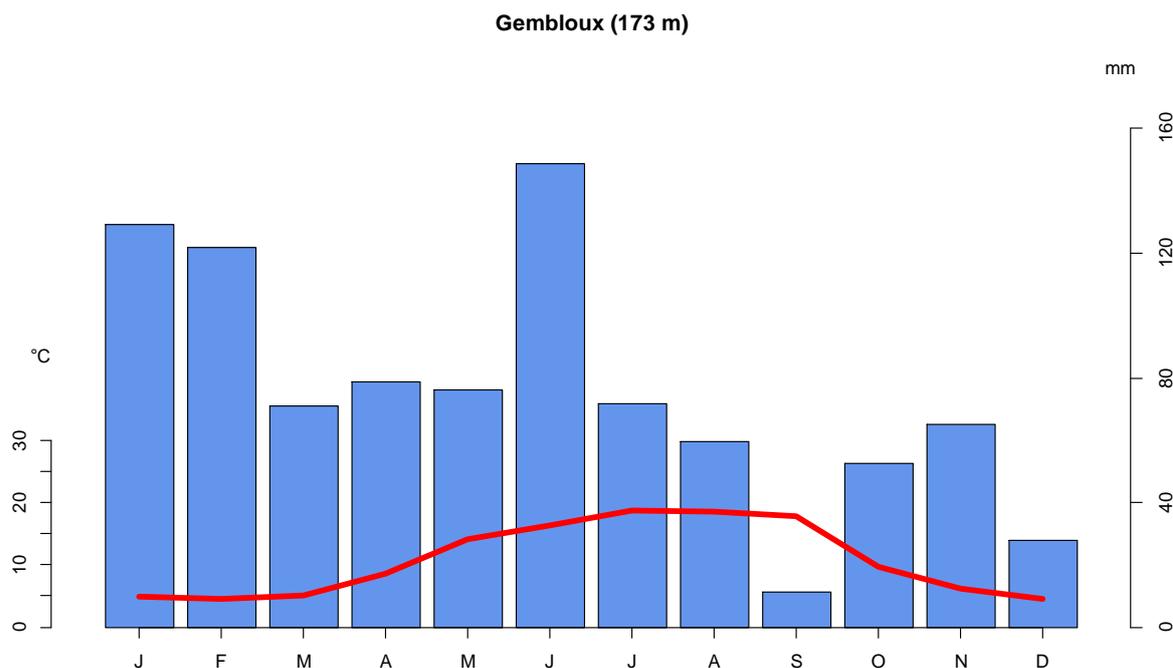


Figure 5 : Températures moyennes en °C et précipitations en mm de l'année 2016 pour Gembloux.
Source : meteobelgique.com

La teneur en eau des échantillons de sol variait entre 12.4 et 21.0% (moyenne de 17.4%). Tous les moments d'échantillonnage sont significativement différents les uns des autres (ANOVA avec permutations, $df=3,18$, $p<0,01$). En correspondance avec les précipitations des semaines précédant l'échantillonnage, la teneur en eau du sol était la plus élevée en juin (moyenne de 18.6%) et la moins élevée en octobre (moyenne de 16.4%). Notez qu'avant la mesure des indicateurs biologiques, l'humidité des échantillons est ajustée à une capacité au champ de 55%. Selon l'échantillon, cela correspond à une teneur en eau entre 19 et 26% dans cette étude.

Cultures et mesures de gestion

L'état des cultures variait entre parcelles, surtout dans la deuxième moitié de l'année après la moisson. Lors du premier échantillonnage, la végétation était dans un état semblable sur toutes les parcelles. Les plantes de froment faisaient moins d'une dizaine de centimètres. Des différences dans la croissance des céréales étaient visibles lors du deuxième échantillonnage. La hauteur des plantes variait entre 65 et 100 cm. Les échantillons d'août ont été collectés après la moisson. Six des sites avaient été labourés et déchaumés avant l'échantillonnage tandis qu'il restait des éteules sur les autres parcelles (site 1, 3, 4, 5 et 9). La quantité de paille qui couvrait le sol variait. L'épandage de fumure n'avait pas encore été fait sur aucune des parcelles. Lors du quatrième échantillonnage, la terre était nue sur trois des parcelles (site 2, 3, et 5). Sur les autres sites, diverses cultures intermédiaires avaient été plantées. Sur une partie des parcelles, des amendements avaient été apportés (chaux, fumure) (site 9, 10 et 11).

Indicateurs chimiques

Les valeurs de COT varient entre 6.3 et 17.8 g C kg⁻¹ (Tableau 3). Le moment d'échantillonnage n'a pas d'effet significatif sur la valeur de COS (ANOVA avec permutations, df=3, p=0.48).

Les valeurs de pH_{H2O} se trouvent entre 6.4 et 8.0 et les valeurs de pH_{KCl} se trouvent entre 5.7 et 7.5 (Tableau 3). Le moment d'échantillonnage a un effet significatif sur le pH_{H2O} (ANOVA avec permutations, df=3,30, p<0.01) et le pH_{KCl} (ANOVA avec permutations, df=3,30, p<0.01). Les valeurs de pH_{H2O} étaient les moins élevées en juin (moyenne de 7.0) et les plus élevées en octobre (moyenne de 7.2). Des différences jusqu'à 0.9 unité entre deux campagnes pour le même site ont été trouvées. Concernant le pH_{KCl}, les valeurs les moins élevées ont également été trouvées en juin (moyenne de 6.2) et les plus élevées en octobre (moyenne de 6.3). Des différences jusqu'à 0.7 unités entre deux campagnes pour le même site ont été trouvées. La variabilité des valeurs de pH_{H2O} et de pH_{KCl} est semblable. La mesure du pH dans une solution minérale a pour but de réduire l'effet de la concentration actuelle de sel de la solution d'un échantillon de sol (Thomas, 1996), mais l'utilisation de KCl comme solution ne réduit pas l'effet de la saisonnalité dans tous les sols.

L'effet de la saisonnalité sur les valeurs de pH du sol a été décrit pour la première fois par Bayer en 1927 (Thomas, 1996). Le principal facteur qui affecte la variabilité saisonnière du pH du sol est la concentration en sel soluble (Collins et al., 1970). En printemps, les concentrations en sel sont élevées suite à la fertilisation (Thomas, 1996). La diminution des sels dans le sol suite à leur assimilation par les plantes et au cours de la période de végétation et la nitrification causent une baisse du pH du sol jusqu'à la moisson (Thomas, 1996). La tendance des valeurs de pH observées dans cette étude correspond à cette explication. En octobre, les valeurs de pH sont influencées par des amendements (p.ex. chaulage sur la parcelle 9), qui peuvent expliquer l'augmentation du pH par rapport aux mois d'été. Les précipitations et par la suite l'humidité du sol peuvent également influencer la concentration de sel dans la solution du sol et par conséquent son pH (Miller et al., 2010). Dans cette étude ce lien n'a pas pu être établi.

Le carbone extrait à l'eau froide se situe entre 23 et 151 mg C kg⁻¹ sol (moyenne de 65 mg C kg⁻¹ sol). Le moment d'échantillonnage n'a pas d'effet significatif sur le carbone extrait à l'eau froide. L'azote extrait à l'eau froide se situe entre 2.6 et 55.0 mg N kg⁻¹ sol (moyenne de 19.0 mg N kg⁻¹ sol). Significativement moins d'azote a été extrait à l'eau froide des échantillons prélevés en juin et en août (moyenne de 13.8 et 12.7 mg N kg⁻¹ sol respectivement) que de ceux prélevés en avril et en octobre (moyenne de 23.6 et 25.9 mg N kg⁻¹ sol respectivement, ANOVA avec permutations, df=3,18, p=0.01). Le rapport C_{soluble}/N_{soluble} a des valeurs entre 0.99 et 26.3 (moyenne de 3.3 g g⁻¹).

Le carbone extrait à l'eau chaude a une gamme de 179 à 759 mg C kg⁻¹ sol (moyenne de 383 mg C kg⁻¹ sol). Le moment d'échantillonnage a un effet significatif sur le carbone extrait à l'eau chaude (ANOVA avec permutations, df=3,18, p<0.0001): en général, le carbone extrait à l'eau chaude diminue pendant la période de végétation d'une moyenne de 372 mg C kg⁻¹ sol en avril à une moyenne de 292 mg C kg⁻¹ sol en juin, puis monte après la moisson (459 et 497 mg C kg⁻¹ sol en août et octobre respectivement, Tableau 3).

L'azote extrait à l'eau chaude a une gamme de 19 à 150 mg N kg⁻¹ sol (moyenne de 53 mg N kg⁻¹ sol). Il existe une corrélation positive entre l'azote et le carbone extrait à l'eau chaude (r(112)=0.74, p<0.0001). Le rapport C/N de l'extrait à l'eau chaude varie entre 4.5 and 16.4 (moyenne de 8.5 g g⁻¹).

Les valeurs de l'azote extrait à l'eau chaude sont significativement différentes à tous les moments d'échantillonnage (ANOVA avec permutations, $df=3,18$, $p<0.0001$). L'azote extrait à l'eau chaude augmente dans l'ordre juin (moyenne de $29 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ sol}$), août (moyenne de $42 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ sol}$), avril (moyenne de $51 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ sol}$) et octobre (moyenne de $90 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ sol}$).

Plusieurs études montrent que le carbone extrait à l'eau froide a une plus importante variabilité (et saisonnalité) que le carbone extrait à l'eau chaude (Ghani, 2003; Uchida et al., 2012). L'effet de l'humidité du sol sur le carbone extrait à l'eau chaude est supposée d'être plus important que celui de la température (Ghani, 2003).

Tableau 3 : Valeurs minimales, médianes, moyennes et maximales pour les indicateurs chimiques par moment d'échantillonnage pour les sept parcelles en agriculture conventionnelle. La valeur p donne le résultat d'une ANOVA avec permutations. Les mesures avec la même lettre minuscule ne sont pas significativement différentes les unes des autres.

		Avril	Juin	Août	Octobre	p
COS g C kg ⁻¹	Min	7.0	6.3	6.7	7.7	0.48
	Médiane	10.0	9.6	9.8	10.0	
	Moyenne	10.1	10.0	9.9	10.3	
	Max	13.0	13.1	17.7	17.8	
Teneur en eau %	Min	16	17	14	12	<0.01
	Médiane	17	18	17	17	
	Moyenne	18	19	17	16	
	Max	20	21	19	19	
pH _{H2O}	Min	6.7	6.4	6.8	6.8	<0.01
	Médiane	7.2	7.0	7.2	7.3	
	Moyenne	7.3	7.2	7.3	7.4	
	Max	8.0	7.9	7.9	7.9	
pH _{KCl}	Min	5.9	5.7	5.7	5.8	<0.01
	Médiane	6.3	6.2	6.2	6.4	
	Moyenne	6.5	6.4	6.3	6.5	
	Max	7.5	7.4	7.1	7.3	
C eau froide mg C kg ⁻¹	Min	34	23	28	37	0.44
	Médiane	67	66	70	48	
	Moyenne	66	71	72	49	
	Max	109	132	151	67	
N eau froide mg N kg ⁻¹	Min	8.0	2.6	4.9	11.8	0.01
	Médiane	20.8	13.5	13.1	25.0	
	Moyenne	23.6	13.8	12.7	25.9	
	Max	55.0	21.9	16.1	45.7	
C _{eau froide} / /N _{eau froide} g g ⁻¹	Min	1.0	1.7	1.9	1.3	<0.01
	Médiane	3.0	5.1	5.2	1.9	
	Moyenne	3.5	6.1	6.2	2.1	
	Max	9.5	26.3	17.7	3.6	
C eau chaude mg C kg ⁻¹	Min	243	179	269	320	<0.01
	Médiane	372	277	431	479	
	Moyenne	372	292	459	497	
	Max	624	570	732	759	
N eau chaude mg N kg ⁻¹	Min	33.1	19.4	25.9	55.3	<0.01
	Médiane	49.2	28.6	39.7	89.8	
	Moyenne	51.4	29.5	41.5	90.0	
	Max	87.3	50.7	59.7	150.1	
C _{eau chaude} / /N _{eau chaude} g g ⁻¹	Min	5.3	7.4	7.8	4.5	<0.01
	Médiane	7.4	9.8	11.1	5.5	
	Moyenne	7.3	10.0	11.2	5.6	
	Max	8.9	13.2	16.4	6.6	

Indicateurs biologiques

Des abondances de vers de terre entre 0 et 172 individus par m² ont été trouvées sur les sites échantillonnés (moyenne de 32 ind. m⁻²). Cela correspond à une masse de vers de terre de 0 à 107 g m⁻² (moyenne de 16 g m⁻²). L'abondance et la masse de vers de terre sont positivement corrélées ($r(28)=0.71$, $p<0.0001$).

L'abondance et la masse de vers de terre montrent une saisonnalité qui semble dépendre du site. Le travail du sol affecte l'abondance des vers de terre : le labour mène à une réduction de l'abondance de vers de terre immédiate (Chan, 2001). Entre la moisson et l'échantillonnage d'août, deux des sept sites avaient été labourés et/ou déchaumés. Tandis qu'aucun vers de terre n'a été trouvé aux sites labourés, leur abondance avait augmenté à quatre des cinq autres sites. La variation de l'humidité du sol est considérée comme le facteur ayant le plus d'effet sur l'abondance et la masse de vers de terre (Curry, 2004). Un état du sol proche de la capacité au champ offre des conditions optimales aux vers de terre. Quand l'humidité du sol diminue en dessous des conditions de survie, les vers de terre descendent en profondeur et deviennent inactifs. Toutefois, surtout pour les vers de terre juvéniles, la mortalité est élevée pendant les périodes de sécheresse (Curry, 2004). Cet effet explique les faibles abondances trouvées à l'échantillonnage d'octobre (5.6 individus m⁻², 3.3 g m⁻²), précédé par une période avec peu de précipitations. Il est à noter que la sécheresse n'affecte pas uniquement l'abondance de vers de terre, mais également la performance de la méthode utilisée. Effectivement, l'extraction avec solution de moutarde nécessite que la solution s'infilte dans le sol, si possible dans toute la profondeur qui présente un habitat aux vers de terre. Cela n'est garanti ni pendant les périodes de sécheresse ni quand le sol est saturé en eau.

La respiration potentielle a des valeurs entre 0.03 et 0.49 mg C-CO₂ kg sol sec h⁻¹ (moyenne de 0.23 mg C-CO₂ kg sol sec h⁻¹). Elle est influencée par le moment d'échantillonnage (ANOVA avec permutations, $df=3,18$, $p=0.03$). La respiration potentielle augmente d'avril (moyenne de 0.22 mg C-CO₂ kg sol sec h⁻¹) à juin et août (0.27 et 0.29 mg C-CO₂ kg sol sec h⁻¹ respectivement), puis diminue en octobre (moyenne de 0.13 mg C-CO₂ kg sol sec h⁻¹, *Tableau 4*).

Dans les conditions in-situ, la respiration du sol est soumise à une variation saisonnière avec des maxima en été et des minima en hiver, contrôlée par la température et l'humidité du sol ainsi que la présence du carbone soluble issu de la photosynthèse (Luo et al., 2006). Pour les mesures ex-situ de la respiration, l'humidité et la température du sol sont ajustées à des conditions standardisées (15°C et 55% de capacité aux champs dans cette étude) ; la respiration potentielle est principalement contrôlée par la disponibilité de substrats carbonés (Waldrop et al., 2006). La tendance saisonnière observée dans cette étude correspond aux résultats publiés. Franzluebbers et al. (1994) décrivent que sous des cultures de froment, la respiration augmente de la semence à la floraison, puis diminue après la moisson.

La minéralisation nette de l'azote a des valeurs entre -0.18 et 1.24 mg N kg⁻¹ sol sec j⁻¹ (moyenne de 0.38 mg N kg⁻¹ sol sec j⁻¹). La minéralisation nette de l'azote est moins élevée dans les échantillons d'avril (moyenne de 0.30 mg N kg⁻¹ sol sec j⁻¹) que dans ceux des autres moments d'échantillonnage. L'effet est significatif (ANOVA avec permutations, $df=3,18$, $p=0.04$). La saisonnalité de la minéralisation nette de l'azote est expliquée par les changements de la population microbienne active et le rapport C/N du substrat présent, 20 étant la valeur seuil (Nunan et al., 2000). En printemps, la minéralisation nette de l'azote est faible, comme la croissance des bactéries peut aboutir à une

immobilisation d'azote (Bloem et al., 1994). La minéralisation nette de l'azote augmente généralement pendant la période de croissance des cultures. Cet effet est très faible dans les échantillons de cette étude. Après la moisson, la minéralisation nette de l'azote peut toujours être assez élevée et un risque de lessivage de nitrates est donné (Bloem, 1994).

La biomasse microbienne a une gamme de valeur entre 45 et 680 mg C kg⁻¹ sol sec (moyenne de 332 mg C kg⁻¹ sol sec). L'azote microbien est entre 23 et 80 mg N kg⁻¹ sol sec (moyenne de 43 mg N kg⁻¹ sol sec). Il y a une corrélation positive entre le carbone et l'azote microbien ($r(112)=0.50$, $p<0.0001$). Les rapports C_{mic}/N_{mic} se trouvent entre 1.2 et 16.1 (moyenne de 7.9 g g⁻¹, *Tableau 4*).

). Le moment d'échantillonnage n'a pas d'effet significatif sur la biomasse microbienne (C_{mic}). Par contre, l'effet du moment d'échantillonnage est significatif sur l'azote microbien (ANOVA avec permutations, $df=3,18$, $p<0.01$) et le rapport C_{mic}/N_{mic} (ANOVA avec permutations, $df=3,18$, $p<0.01$). L'azote microbien diminue d'avril (moyenne de 46 mg N kg⁻¹ sol sec) à juin (moyenne de 42 mg N kg⁻¹ sol sec) à août (moyenne de 39 mg N kg⁻¹ sol sec), tandis que le rapport C_{mic}/N_{mic} augmente conformément. En octobre, l'azote microbien (moyenne de 48 mg N kg⁻¹ sol sec) et le rapport C_{mic}/N_{mic} reviennent à des mesures semblables à ceux d'avril. Le rapport C_{mic}/N_{mic} suit la même tendance générale que le rapport $C_{soluble}/N_{soluble}$ et C_{labile}/N_{labile} .

La biomasse microbienne est soumise à des variations saisonnières qui sont liées à la disponibilité de carbone organique et d'azote, l'humidité et la température du sol. Dans la littérature, l'effet de la saisonnalité est variable entre études, spécifiquement en ce qui concerne l'azote microbien. Généralement, le carbone microbien a une variabilité saisonnière avec des maxima en été et des minima en hiver (Wardle, 1998). L'amplitude de la variabilité saisonnière est liée à la latitude ; un pH et un taux de carbone organique du sol élevés semblent atténuer la saisonnalité du carbone microbien (Wardle, 1998). Pour des cultures sous froment en Allemagne, une augmentation de la biomasse microbienne dès la semence a été observée, l'azote microbien montrant une variabilité saisonnière plus importante que le carbone microbien (Joergensen et al., 1994). Pour des cultures sous froment au Texas, une augmentation de la biomasse microbienne (C_{mic}) de la semence à la floraison a été observée, liée aux fluctuations d'exsudats rhizosphériques (Franzluebbers, 1994). Comme dans notre étude, une augmentation du rapport C_{mic}/N_{mic} est mesurée, expliquée par l'ajout de substrat carboné (exsudats rhizosphériques, racines et résidus de récolte) et l'immobilisation de l'azote (Franzluebbers, 1994). Pour des cultures d'orge, aucune corrélation entre le carbone et l'azote microbien n'a été trouvée (Ritz et al., 1988) ; dans cette étude, les variations de la biomasse microbienne ne suivent pas de tendances qui peuvent directement être liées à la croissance des cultures. La saisonnalité de la biomasse microbienne peut dépendre de la pratique de gestion : dans une étude avec des cultures de maïs, des biomasses microbiennes plus élevées ont été mesurées en avril qu'en juillet pour des parcelles en sans-labour, tandis qu'il n'y avait pas de différences pour les contrôles (Shi et al., 2013).

La diversité fonctionnelle des bactéries se situe entre 35 et 74 % de substrats utilisés (moyenne de 57 % de substrats utilisés). Le moment d'échantillonnage a un effet significatif sur la diversité fonctionnelle des bactéries (ANOVA avec permutations, $df=3,18$, $p<0.01$) : elle est le moins élevée en avril (51 % de substrats utilisés) et le plus élevée en juin (62 % de substrats utilisés). En août et octobre, la diversité fonctionnelle est de 57 et 56 % de substrats utilisés respectivement (*Tableau 4*). La disponibilité de substrats carbonés et d'eau dans le sol influence la présence de certaines

communautés microbiennes et les fonctions qu'elles accomplissent (Bossio et al., 1995). Sous un climat méditerranéen, la diversité fonctionnelle est moins élevée en hiver qu'en été ; l'humidité du sol étant supposée d'être le facteur majeur (Bossio, 1995; Costa et al., 2013).

Le quotient métabolique se situe entre 0.11 et 5.11 mg kg⁻¹ h⁻¹ (moyenne de 0.74 mg kg⁻¹ h⁻¹). Le moment d'échantillonnage n'a pas d'effet significatif sur le quotient métabolique (ANOVA avec permutations, df=3,18, p=0.06). Les quotients métaboliques des échantillons prélevés en octobre (moyenne de 0.41 mg kg⁻¹ h⁻¹) sont légèrement inférieurs à ceux lors des autres moments d'échantillonnage (*Tableau 4*). Notez que c'est le seul moment d'échantillonnage que le quotient métabolique prend des valeurs supérieures à 2 mg C-CO₂ kg⁻¹ C h⁻¹, des valeurs supérieures à ce seuil indique un état de stress de la communauté microbienne (Anderson et al., 1990), pour deux échantillons. Le quotient microbien a des valeurs entre 0.53 et 6.52 (moyenne de 3.30). Le moment d'échantillonnage n'a pas d'effet significatif sur le quotient microbien.

Le moment d'échantillonnage a un effet significatif sur six des dix indicateurs biologiques mesurés. L'abondance des vers de terre, la respiration potentielle, la minéralisation nette de l'azote, l'azote microbien, le rapport C_{mic}/N_{mic} et la diversité fonctionnelle des bactéries montrent tous les effets de la saisonnalité (*Tableau 4*). Le moment d'échantillonnage influence les indicateurs biologiques différemment ; les valeurs liées au cycle du carbone (respiration potentielle, carbone microbien et quotient microbien) ont tendance à être plus élevées après la moisson que lors des autres moments d'échantillonnage, possiblement suite à la disponibilité de résidus organique. Les valeurs minimales sont généralement mesurées soit en avril, soit en octobre. Neuf des dix indicateurs biologiques mesurés ne montrent pas de différences significatives entre l'échantillonnage de juin et l'échantillonnage d'août ; seule la diversité fonctionnelle est significativement plus élevée en juin qu'en août. Bien que la moisson, qui présente une perturbation majeure pour le sol, ait été effectuée entre les deux campagnes de terrain, les mesures d'indicateurs biologiques étaient les plus stables pendant cette période. Les échantillonnages de juin et d'octobre ont le plus d'indicateurs biologiques significativement différents (abondance des vers de terre, respiration potentielle, azote microbien, rapport C_{mic}/N_{mic}, diversité fonctionnelle des bactéries du sol). Les périodes précédant les deux échantillonnages étaient marquées par des précipitations hors des normales, ce résultat pour l'année 2016 n'est donc pas nécessairement transmissible à des années avec des tendances météorologiques plus proches des moyennes.

Tableau 4 : Valeurs minimales, médianes, moyennes et maximales pour les indicateurs biologiques par moment d'échantillonnage pour les sept parcelles en agriculture conventionnelle. La valeur p donne le résultat d'une ANOVA avec permutations. Les mesures avec la même lettre minuscule ne sont pas significativement différentes les unes des autres.

		Avril	Juin	Août	Octobre	p
Abondance des vers de terre Ind. m ⁻²	Min	0	6	0	0	
	Médiane	22	33	61	6	
	Moyenne	27	34	61	6	
	Max	67	78	172	22	
Masse des vers de terre g m ⁻²	Min	0.0	0.6	0.0	0	
	Médiane	9.4	6.1	21.7	0.6	
	Moyenne	14.8	9.8	34.4	0.6	
	Max	44.4	27.2	107.2	15.0	
Respiration potentielle mg C-CO ₂ kg ⁻¹ h ⁻¹	Min	0.03	0.02	0.18	0.06	0.03
	Médiane	0.20	0.25	0.30	0.12	
	Moyenne	0.22	0.27	0.29	0.13	
	Max	0.43	0.49	0.46	0.26	
Minéralisation nette de l'azote mg N kg ⁻¹ C j ⁻¹	Min	-0.15	-0.04	-0.18	0.02	0.04
	Médiane	0.34	0.44	0.39	0.38	
	Moyenne	0.30	0.47	0.37	0.39	
	Max	0.71	1.24	0.84	0.81	
Biomasse microbienne mg C kg ⁻¹	Min	45	125	54	187	0.16
	Médiane	279	314	361	294	
	Moyenne	306	343	363	315	
	Max	680	654	618	524	
Azote microbien mg N kg ⁻¹	Min	27	28	23	27	<0.01
	Médiane	45	39	39	41	
	Moyenne	46	42	39	47	
	Max	80	67	77	80	
C _{mic} /N _{mic} g g ⁻¹	Min	1.2	3.3	1.7	3.8	<0.01
	Médiane	6.6	8.2	9.6	6.8	
	Moyenne	6.8	8.2	9.6	6.9	
	Max	13.9	13.9	16.1	11.1	
Diversité fonctionnelle %	Min	35	48	35	42	<0.01
	Médiane	52	63	58	56	
	Moyenne	51	62	57	56	
	Max	68	74	71	71	
Quotient métabolique mg C-CO ₂ kg ⁻¹ C h ⁻¹	Min	0.11	0.38	0.17	0.20	0.06
	Médiane	0.71	0.87	0.60	0.37	
	Moyenne	0.75	0.91	0.86	0.41	
	Max	1.56	1.98	5.11	0.83	
Quotient microbien	Min	0.53	1.30	0.53	1.56	0.17
	Médiane	2.76	3.36	3.56	3.12	
	Moyenne	3.02	3.43	3.64	3.13	
	Max	5.73	5.32	6.52	5.11	

Effet d'une pré-incubation sur la respiration

La mesure appelé 'respiration basale' dans les rapports des subventions CARBIOSOL 1 et CARBIOSOL 2 est à présent appelée 'respiration potentielle'. En plus de la respiration potentielle, la respiration est mesurée après une, deux et trois semaines d'incubation pour tester l'effet de la pré-incubation. Dans la littérature récente, la respiration basale est définie comme la production de CO₂ ou l'utilisation d'O₂ par un sol dans un état stable à l'origine du renouvellement de la matière organique (Pell et al., 2006). Cependant les conditions de pré-incubation, incubation et durée des mesures sont variables (Creamer et al., 2014). Comme la préparation des échantillons pour la mesure présente une perturbation, une pré-incubation d'au moins une semaine avant les mesures est parfois conseillée. La mesure évite alors l'augmentation temporaire de la respiration du sol due à la libération de nutriments suite à la perturbation et l'établissement d'un équilibre entre le CO₂ gazeux et dissous (Pell, 2006, ISO, 2002). De plus, la pré-incubation est supposée réduire l'effet de la saisonnalité sur les mesures d'indicateurs biologiques (Bloem et al., 2005). Notez que les conseils de pré-incubation s'appliquent principalement à des échantillons précédemment séchés ou congelés (ISO 10381-6). De même, certains conseils sont issus d'une optimisation pour déterminer la mesure de respiration à partir d'un seul point de mesure, en plus du temps (Creamer, 2014). Dans notre étude, les échantillons sont stockés à 4°C pour au moins cinq jours après le tamisage et l'ajustement à la capacité au champ qui présentent des perturbations plus importantes que le pesage et le réchauffement des sous-échantillons de 4 à 15°C, effectués 16h avant la mesure de la respiration potentielle. Les mesures de respiration sont calculées par régression linéaire à partir de quatre points de mesure.

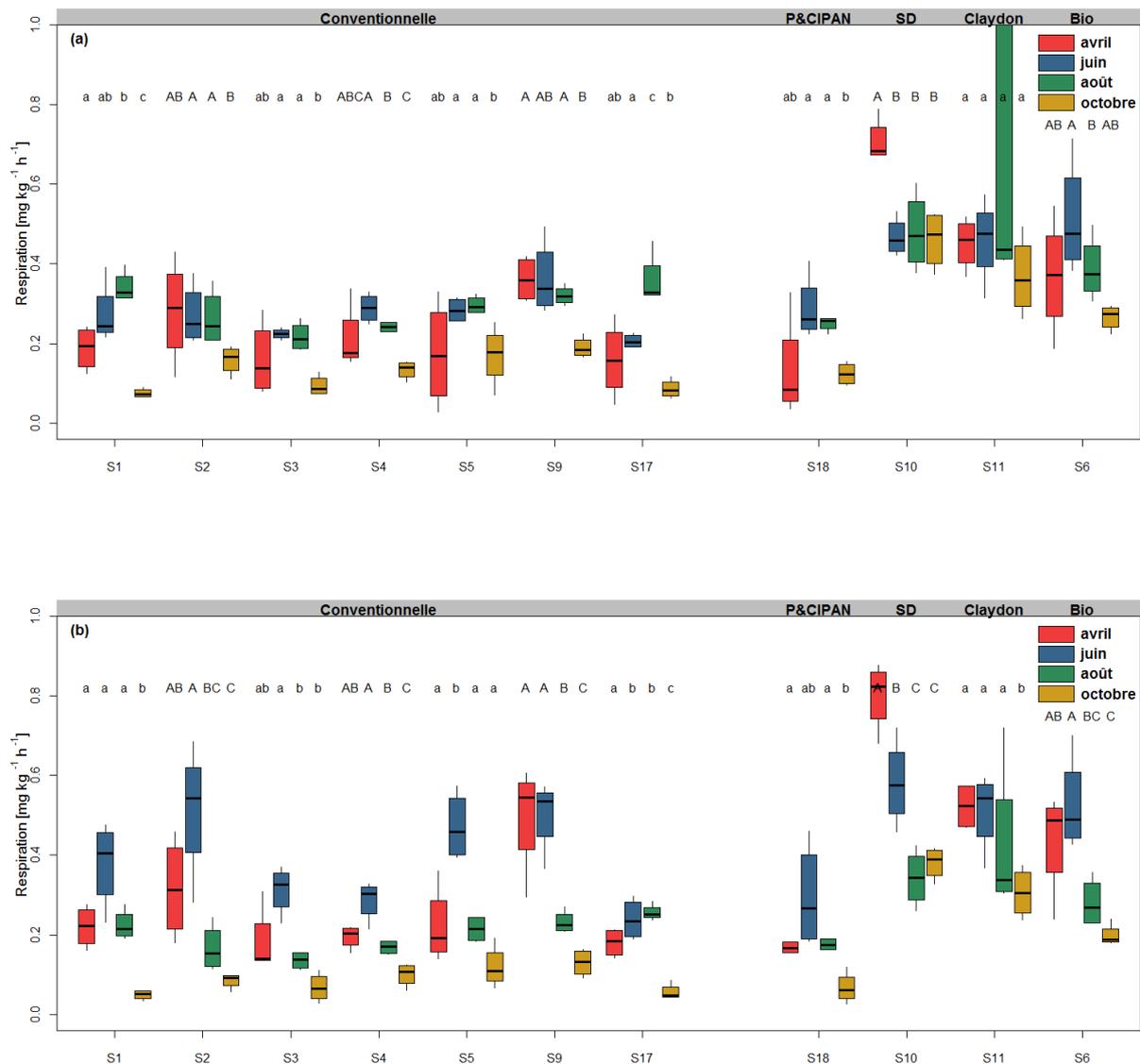
Les données sont analysées afin de répondre aux questions : (1) Est-ce que la mesure de respiration est différente en fonction de la durée de pré-incubation ? (2) Est-ce que le moment d'échantillonnage influence l'effet de la pré-incubation sur la respiration ? (3) Est-ce que la pré-incubation influence le pouvoir discriminatoire de la respiration ? (4) Est-ce que la pré-incubation a un effet sur la variabilité spatiale et saisonnière de la respiration ?

Au cours des trois semaines d'incubation, la production de CO₂ mesurée variait significativement (ANOVA avec permutation, df=3,444, p<0.0001), sans suivre la même tendance pour les différents moments d'échantillonnage ou sites. La première mesure (respiration potentielle) était la plus élevée des quatre temps pour environ la moitié des échantillons, la deuxième mesure pour 30% et la quatrième pour 20% des échantillons. Les facteurs entre la mesure minimale et maximale d'un même échantillon se situaient entre 1.12 et 136 (médiane de 2.4). 19% des mesures après incubations sont en dehors des gammes définies par la respiration potentielle.

L'effet du site et l'effet du moment d'échantillonnage sont significatifs pour la respiration potentielle (ANOVA avec permutations, df=3,3,9,96, p<0.0001), mais il n'y a pas d'interaction entre les deux. Par contre, l'interaction entre le site et le moment d'échantillonnage est significatif pour les trois mesures après pré-incubation. En générale, les différences entre moments d'échantillonnage sont significatives pour plus de sites après 7 ou 14 jours que pour la respiration potentielle, tandis qu'il y a moins de sites avec des différences significatives après 21 jours que pour la respiration potentielle (Figure 6). Une pré-incubation d'une ou deux semaines a donc augmenté plutôt que réduit l'effet de la saisonnalité dans notre étude. En général, si deux sites sont significativement différents l'un de l'autre pour la respiration potentielle, ils le sont également après une période de pré-incubations (données non-présentées). Cela indique que pour différencier entre sites, la respiration potentielle est aussi pertinente que la respiration basale. Les avantages de l'incubation plus courte (temps de travail,

disponibilité de matériel etc.) justifie l'utilisation de la respiration potentielle dans le réseau de surveillance CARBIOSOL.

Les coefficients de variation (CV) permettent de comparer la variabilité due à différents temps de pré-incubation ($CV_{\text{pré-incubation}}$, $n=4$) à la variabilité entre moments d'échantillonnage (CV_{saison} , $n=4$) et la variabilité spatiale au sein d'une même parcelle (CV_{parcelle} , $n=4$) et aident à mettre l'amplitude des différences dues à la pré-incubation dans un contexte avec les fluctuations naturelles des mesures de respiration. Les $CV_{\text{pré-incubation}}$ (5.1 – 149 %, médiane de 37 %) sont supérieurs aux CV_{parcelle} à travers tous les temps de pré-incubation (2.2 – 118 %, médiane de 24 %) et inférieurs aux CV_{saison} à travers tous les temps de pré-incubations (9.0 – 106 %, médiane de 48 %). Le CV_{parcelle} est significativement influencé par le moment d'échantillonnage (ANOVA avec permutations, $df=3,3,9,96$, $p<0.05$) mais il n'y a ni un effet du temps de pré-incubation ni une interaction entre les deux. Par contre, le temps de pré-incubation a un effet significatif sur le CV_{saison} (ANOVA avec permutations, $df=3,108$, $p<0.01$). Le CV_{saison} de la première mesure (43%) est significativement inférieur à celui de la deuxième mesure (58%) et non-significativement inférieur à ceux de la troisième (50%) et quatrième (44%) mesures.



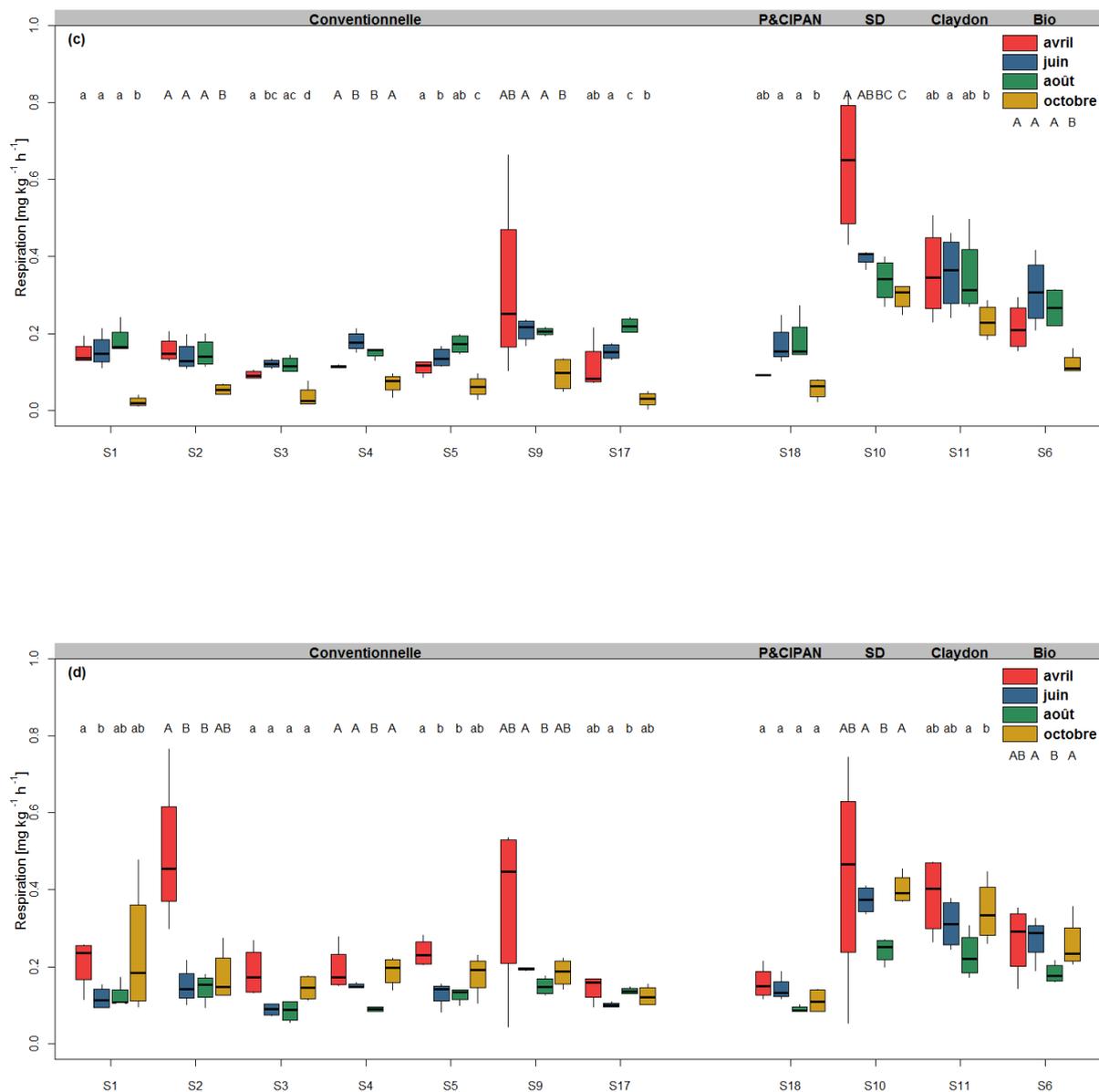


Figure 6 : Box-plots de la respiration pour l'échantillonnage d'avril (rouge), de juin (bleu), d'août (vert) et d'octobre (jaune) par parcelle après une pré-incubation (a) de 16 heures, (b) de 7 jours, (c) de 14 jours et (d) de 21 jours. Les mêmes lettres indiquent des respirations non-significativement différentes (calculé séparément pour chaque site).

Définition des gammes de valeurs ‘normales’

Effet de la saisonnalité sur les gammes de valeurs

L’effet du moment d’échantillonnage sur les gammes de valeurs ‘normales’ est testé (1) par comparaison des gammes calculées par moment d’échantillonnage les uns aux autres et (2) à la gamme calculée pour l’ensemble des valeurs ainsi que (3) par le pouvoir à discriminer entre les différentes gammes et les parcelles en agriculture biologique/de conservation. Les gammes de valeurs ‘normales’ sont exprimées par deux moyens, un moyen mathématique (pression écosystémique normalisée NES et gammes de valeurs normales NOR) et un moyen graphique (plot radar).

Pour rappel, l’effet du moment d’échantillonnage était significatif pour cinq des huit indicateurs biologiques considérés dans le calcul d’ellipsoïdes et des plots radar (§ 3.2). Pour ces indicateurs biologiques (respiration potentielle, C_{mic}/N_{mic} , diversité fonctionnelle, vers de terre, minéralisation nette de l’azote), les gammes de valeurs définies pour chaque moment d’échantillonnage diffèrent donc en ce qui concerne leur position et leur amplitude.

La comparaison des données de chaque moment d’échantillonnage aux NOR des trois autres échantillonnages montre que la majorité des points n’y sont pas inclus. Concrètement, aucun point de l’échantillonnage d’avril, de juin ou d’août ne se trouve à l’intérieur de l’ellipsoïde d’octobre (exprimés en forme d’ellipsoïdes à huit dimensions) ; avec 26 des 84 points, l’ellipsoïde d’août inclut le plus de points provenant d’autres échantillonnages. Échantillonnée à un autre moment, la majorité des points seraient donc considérée ‘hors des gammes’ sans considération de la saisonnalité, bien que les gammes soient définies à partir des mêmes parcelles.

Les plots radar visualisent des larges gammes en août et des gammes plus étroites en octobre (Figure 7). La forme tracée par la médiane est semblable à tous les moments d’échantillonnage indiquant que la tendance générale de la qualité biologique est similaire à travers les moments d’échantillonnage. Toutefois, les gammes décrites par les quartiles (qui incluent donc 50% des valeurs) des quatre moments d’échantillonnage ne se chevauchent que pour trois des huit indicateurs biologiques inclus (carbone microbien, quotient microbien et minéralisation nette de l’azote). Les plots radar permettent donc de visualiser les différences, tout en montrant également des similarités entre moments d’échantillonnages.

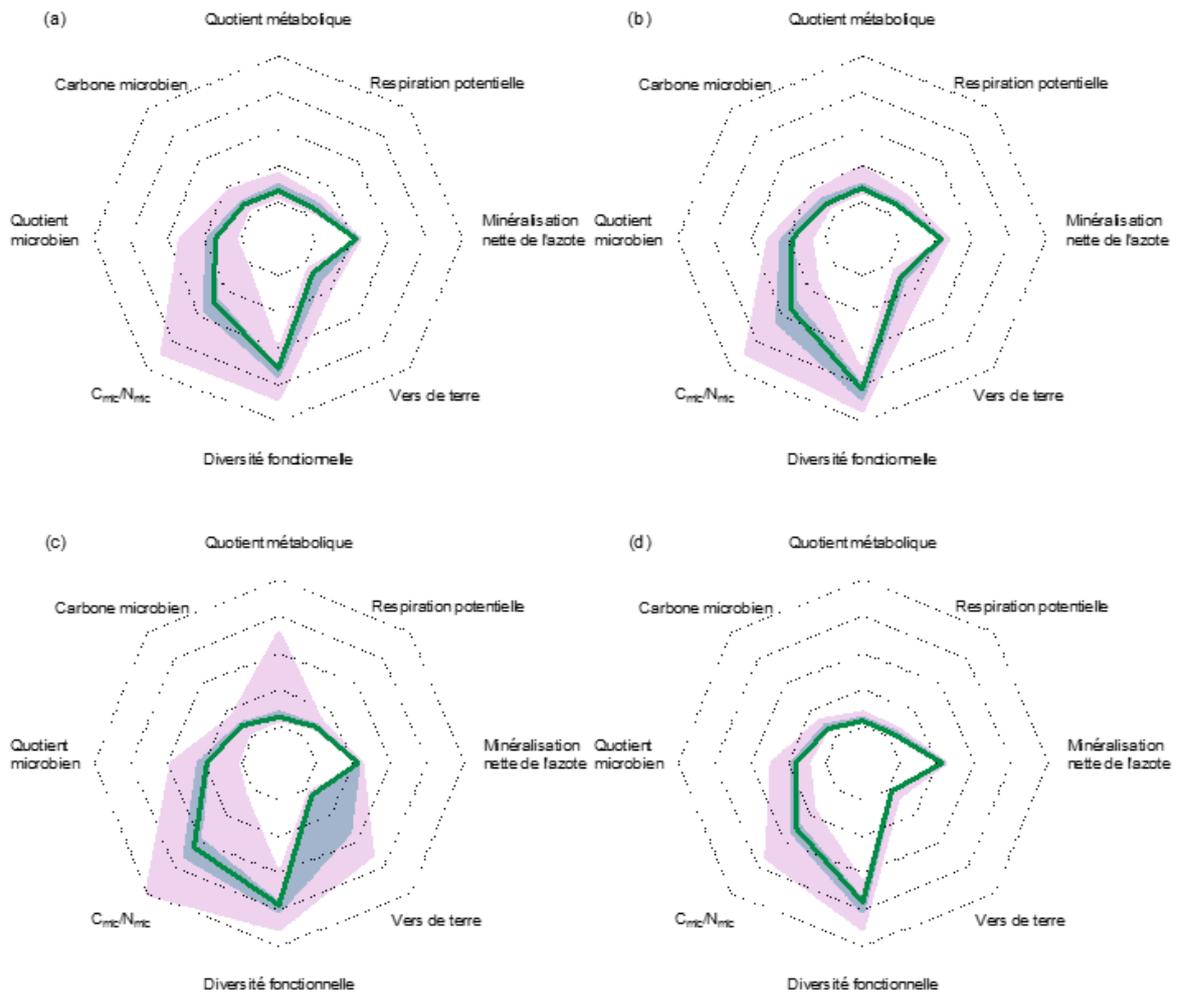


Figure 7 : Plots radar des cultures en agriculture conventionnelle pour l'échantillonnage (a) d'avril, (b) de juin, (c) d'août et (d) d'octobre avec les gammes entre valeurs extrêmes en rose, les gammes entre 1^{er} et 3^{ème} quartile en bleu et la médiane en vert.

La combinaison des quatre échantillonnages crée une base de données avec 112 points. L'ellipsoïde à huit dimensions qui décrit la NOR a des axes plus longs que celles des moments d'échantillonnage uniques. Les centres des ellipsoïdes diffèrent entre tous les ellipsoïdes (Tableau 5). Les pressions écosystémiques normalisées (NES) du jeu de données entier sont généralement inférieures à celles calculées par moment d'échantillonnage (Annexe 3). Les gammes montrées dans le plot radar (Figure 8) sont jusqu'à huit fois plus large que celles définies par moment d'échantillonnage (Tableau 7, Tableau 8) ; la médiane montre la même tendance générale (Figure 7, Figure 8).

Tableau 5 : Centres des ellipsoïdes à 8 dimensions pour culture en agriculture conventionnelle.

	Respiration potentielle	Carbone microbien	C _{mic} /N _{mic}	Diversité fonctionnelle	Vers de terre	Minéralisation nette de l'azote	Quotient métabolique	Quotient microbien
Avril (n=28)	0.24	349	7.5	52	28	0.31	0.76	3.36
Juin (n=28)	0.27	334	7.9	63	32	0.59	0.99	3.40
Août (n=28)	0.30	364	9.4	57	56	0.42	1.21	3.35
Octobre (n=28)	0.13	324	6.8	57	6	0.41	0.42	3.25
4 moments (n=112)	0.25	331	8.2	58	37	0.49	1.22	3.08

Le but de la définition de gammes de valeurs normales est la création d'un outil d'évaluation de la qualité biologique des sols. Pour chaque moment d'échantillonnage, les points des quatre parcelles en agriculture de conservation/biologique de cette étude sont en dehors de la gamme définie par l'ellipsoïde du moment d'échantillonnage correspondant pour les parcelles en agriculture conventionnelle, et ceci pour tous les 16 points sur les parcelles 6 (agriculture biologique), 10 (semis direct) et 11 (TCS/Claydon) et pour cinq des seize points sur la parcelle 18 (P&CIPAN). Cela montre que la qualité biologique y est différente que sur les parcelles en agriculture conventionnelle, sans donner de renseignement sur le nombre d'indicateurs biologiques différents ou la direction de la différence. Lorsque les valeurs des quatre échantillonnages sont combinées dans un ellipsoïde, le nombre des seize points en dehors des gammes ainsi définies est réduit à deux points pour la parcelle 18 (P&CIPAN), six points pour la parcelle 6 (agriculture biologique), onze points pour la parcelle 10 (semis direct) et treize points pour la parcelle 11 (TCS/Claydon).

La pression écosystémique normalisée (NES) permet de quantifier la divergence de la NOR. Les NES₂₈ (par moment d'échantillonnage) et les NES₁₁₂ (tous les moments d'échantillonnage) sont analysées afin d'identifier si le moment d'échantillonnage a un effet sur son pouvoir discriminatoire. Une ANOVA avec permutation à deux facteurs montre que pour les NES₂₈ et tout comme les NES₁₁₂, il y a un effet significatif du site ($p < 0.0001$), mais ni d'effet significatif du moment d'échantillonnage ni d'interaction entre les deux. Les NES₂₈ des parcelles 6, 10 et 11 (en agriculture biologique, semis direct et TCS/Claydon respectivement) sont significativement différentes de toutes les autres parcelles, et la parcelle 6 est différente de la parcelle 10 (voir Annexe 4). Les NES₁₁₂ des parcelles 10 et 11 (en semis direct et TCS/Claydon respectivement) sont significativement différentes de toutes les autres parcelles, mais pas l'une de l'autre. Les NES₁₁₂ des parcelles 6 et 18 (agriculture biologique et P&CIPAN) ne sont pas significativement différentes des parcelles en agriculture conventionnelle. Cela démontre que la considération de la variabilité saisonnière réduit le pouvoir discriminatoire, ce qui peut présenter une difficulté lorsque des résultats de différentes campagnes de terrain sont comparés.

Tableau 6 : Résultats des ANOVA avec permutation à deux facteurs (site et moment d'échantillonnage) sur la NES₁₁₂ et la NES₂₈.

	Facteur	Df	Somme carrée	Moyenne carrée	Itération	Pr
NES ₁₁₂	Site	10	20.7	2.07	5000	<0.0001
	Moment	3	1.3	0.42	416	0.54
	Site x Moment	30	17.7	0.59	5000	0.18
NES ₂₈	Site	10	96.2	9.62	5000	<0.0001
	Moment	3	1.5	0.50	262	1.00
	Site x Moment	30	58.6	1.95	5000	0.13

Tout comme le score compréhensif présenté dans le projet CARBIOSOL1, le calcul de NES présente une perte d'information par rapport à l'observation séparée de chaque indicateur biologique. Notez que le score compréhensif est différent de la NES en ce qui concerne l'objectif de son calcul, en plus de l'approche mathématique. Le score compréhensif est basé sur le principe 'plus est meilleur', tandis que la NES exprime la différence avec l'état moyen (normal).

Les plots radar visualisent si les indicateurs biologiques sont hors d'une gamme définie : Pour 42//21 (par moment d'échantillonnage//pour l'année 2016) des 64 points sur parcelle en agriculture biologique/de conservation, au moins un des indicateurs biologiques a une valeur hors de la gamme décrite par les valeurs extrêmes des parcelles sous agriculture conventionnelle. 27//6 % combinaisons indicateur biologique/point (n=516) se trouvent hors de cette gamme ; 63//56 % se trouvent hors des quartiles des sites sous agriculture conventionnelle. Pour rappel, ces derniers sont définis de façon à contenir 50% des valeurs des parcelles en agriculture conventionnelle.

Le plot radar (Figure 8) montre que les médianes des quatre parcelles en agriculture biologique/de conservation (médiane des 16 échantillons par parcelle à quatre moments d'échantillonnage) se trouvent dans les gammes extrêmes (surface rose) des sites en agriculture conventionnelle (112 points d'échantillonnage). La parcelle 18 (magenta) suit la tendance générale des sites en agriculture conventionnelle (médiane verte) ; pour les trois autres parcelles de plus grandes différences, notamment en abondance des vers de terre, carbone microbien et respiration potentielle sont visibles. Des box-plots montrant les valeurs des indicateurs biologiques par site et campagne de terrain en détail se trouvent dans l'Annexe 5.

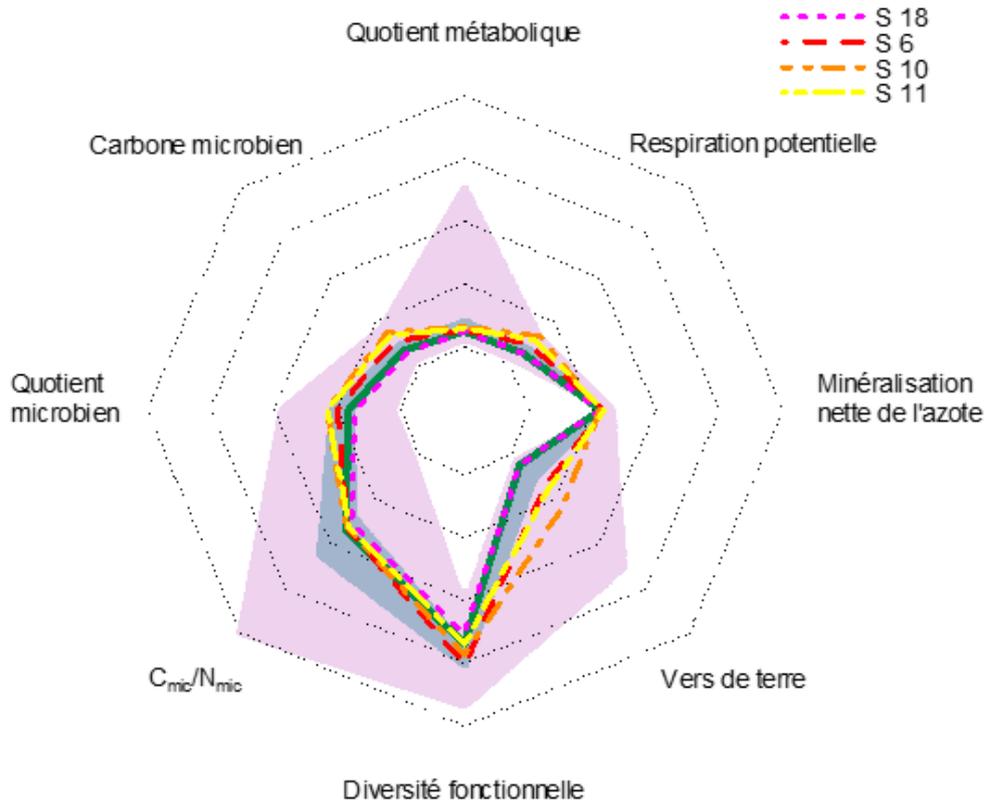


Figure 8 : Plot radar des cultures conventionnelles de tous les moments d'échantillonnage avec les gammes entre valeurs extrêmes en rose, les gammes entre 1^{er} et 3^{ème} quartile en bleu et la médiane en vert en plus des médianes des échantillons des parcelles 6 (rouge / agriculture biologique), 18 (magenta / P&CIPAN), 10 (orange / semis direct) et 11 (jaune / TCS/Claydon).

Tableau 7 : Largeur des gammes de valeurs (entre minimum et maximum) pour chaque moment d'échantillonnage par rapport au jeu de données entier en %.

		Quotient métabolique	Respiration potentielle	Minéralisation nette de l'azote	Vers de terre	Diversité fonctionnelle	C_{mic}/N_{mic}	Quotient microbien	Carbone microbien
Microsites (n=28)	Tout	100	100	100		100	100	100	100
	Avril	30	86	61		83	85	87	100
	Juin	32	65	91		67	71	67	83
	Août	99	58	71		92	97	100	89
	Octobre	13	42	56		75	49	59	53
Médianes par parcelle (n=7)	Tout	22	61	40	100	63	39	56	61
	Avril	7	47	17	39	25	17	28	40
	Juin	17	29	23	42	25	28	28	48
	Août	16	25	40	100	33	12	46	53
	Octobre	5	24	24	13	54	23	32	22

Tableau 8 : Largeur des gammes de valeurs (entre 1^{er} et 3^{ème} quartile) pour chaque moment d'échantillonnage par rapport au jeu de données entier en %.

		Quotient métabolique	Respiration potentielle	Minéralisation nette de l'azote	Vers de terre	Diversité fonctionnelle	C _{mic} /N _{mic}	Quotient microbien	Carbone microbien
Microsites (n=28)	Tout	100	100	100		100	100	100	100
	Avril	102	121	93		75	60	73	89
	Juin	84	59	70		108	92	98	131
	Août	69	52	97		75	80	87	74
	Octobre	36	65	81		100	42	53	84
Médianes par parcelles (n=7)	Tout	47	83	59	100	75	57	76	85
	Avril	9	54	38	91	42	23	53	57
	Juin	58	36	34	55	83	44	73	86
	Août	29	55	42	355	67	22	37	58
	Octobre	32	61	43	18	50	38	26	76

Comparaison des gammes de valeurs CARBIOSOL

Les campagnes de terrain précédentes visaient à étudier la variabilité spatiale : la variabilité au sein de la Région Limoneuse (CARBIOSOL1) puis la variabilité à travers cinq régions agricoles représentatives pour une partie majeure de la Wallonie (CARBIOSOL2). La représentativité des trois jeux de données a été définie suivant la question du projet ; les jeux de données ne sont donc pas représentatifs pour les mêmes sites. La sélection de sites dans les projets CARBIOSOL1 et 2, choisis du pool des points de la base de données Aardewerk, ne tenait pas compte de la culture actuelle ou de la pratique de gestion. Dans le projet CARBIOSOL3, les critères définis limitaient la sélection à des sites avec une même culture (froment d'hiver) avec le même précédent (betteraves) avec une pratique de gestion définie (agriculture conventionnelle). Les parcelles sélectionnées se trouvent tous dans la partie de la Wallonie pour laquelle les gammes CARBIOSOL2 sont considérés comme représentatives. Toutefois, des 112 points sous agriculture conventionnelle, seuls 34 se trouvent dans les gammes décrites par un ellipsoïde des données sous culture du projet CARBIOSOL2 échantillonnées en juin 2015. Les échantillons collectés en juin 2016 ne sont pas plus semblable à celle de CARBIOSOL2 que ceux collectés en avril ou octobre 2016. Par contre, les NES des échantillons collectés en août sont significativement plus élevés que celles des échantillons collectés à d'autres moments (ANOVA avec permutations, df=3.6, 18.84, p<0.0001) indiquant une différence plus importante aux autres moments d'échantillonnage. Notez que les températures moyennes de juin étaient semblables en 2015 et 2016, tandis que les précipitations diffèreraient, le printemps 2016 ayant été marqué par des précipitations importantes et le printemps 2015 par des précipitations déficitaires (source : meteobelgique.com).

Dans les plots radar, la gamme de valeur de chaque indicateur est montrée sur un axe de la valeur minimale de l'ensemble du jeu de données au centre, à la valeur maximale de l'ensemble du jeu de données à l'extrémité de la figure. Les axes d'un plot radar n'ont pas d'unités ; la largeur des gammes de valeurs présentées est relative aux valeurs extrêmes. Les plots radar présentés dans le

rapport CARBIOSOL2 n'incluent que les valeurs collectées en cours de cette campagne d'échantillonnage, soit 30 cultures à travers quatre régions agricoles. La visualisation des données CARBIOSOL3 a nécessité l'adaptation des axes. Pour le jeu de données CARBIOSOL2, ces modifications aux axes résultent dans des gammes de valeur plus étroites que si seules les valeurs extrêmes de cette campagne de terrain seraient utilisées pour définir les limites (Figure 9). Notez que par rapport aux plots radars présentés dans le rapport CARBIOSOL2, l'azote microbien a été remplacé par le rapport C_{mic}/N_{mic} et les quotients éco-physiologiques ont été ajoutés aux mesures présentées.

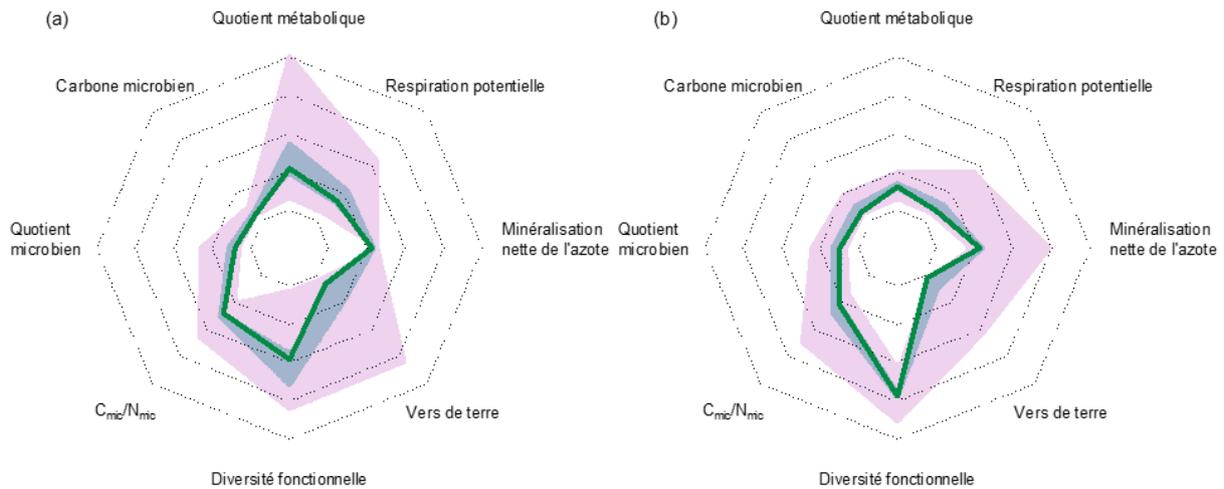


Figure 9 : Plots radar des données pour culture collectés dans (a) le projet CARBIOSOL1 et (b) le projet CARBIOSOL2 avec les gammes entre valeurs extrêmes en rose, les gammes entre 1^{er} et 3^{ème} quartile en bleu et la médiane en vert.

En détail, le jeu de données CARBIOSOL3 inclut des maxima plus élevés que ceux de CARBIOSOL2 pour le quotient métabolique (5.11 contre 2.11 mg C-CO₂ kg h⁻¹), le rapport C_{mic}/N_{mic} (16.1 contre 10.4) et la respiration potentielle (2.9 contre 2.5 mg C-CO₂ kg sol sec h⁻¹). De plus, l'inclusion du jeu de données CARBIOSOL1 nécessite l'adaptation de l'axe du quotient métabolique (8.0 mg C-CO₂ kg h⁻¹), de l'abondance des vers de terre (272 contre 211 ind. m⁻²) et de la minéralisation nette de l'azote (13.8 contre 8.8 mg N kg⁻¹ sol sec j⁻¹). En ce qui concerne les minima, le jeu de données CARBIOSOL3 inclut des valeurs inférieures à celles de CARBIOSOL2 pour le quotient métabolique (0.10 contre 0.42 mg C-CO₂ kg h⁻¹), le carbone microbien (45 contre 140 mg C kg⁻¹ sol sec), le quotient microbien (0.53 contre 1.14), le rapport C_{mic}/N_{mic} (1.2 contre 4.3), la diversité fonctionnelle (35 contre 39 %) et la respiration potentielle (0.03 contre 0.12 mg C-CO₂ kg sol sec h⁻¹). De plus, la valeur minimale de la diversité fonctionnelle (10 %) du jeu de données CARBIOSOL1 est inférieure à celle du jeu de données de CARBIOSOL2. En tout seuls 41 des 176 points se trouvent dans les gammes (valeurs extrêmes) pour tous les indicateurs biologiques définies dans CARBIOSOL2 (prairies incluses). Par rapport aux sites sous culture, 32 des 176 points se trouvent entre les gammes définies pour les cultures dans CARBIOSOL2.

Les plots radar des données sous culture des trois projets montrent des tendances différentes. La médiane des sites CARBIOSOL1 (Région limoneuse, novembre 2013), indique notamment des valeurs plus élevées pour la respiration potentielle et pour le quotient métabolique. Les tendances

générales des sites CARBIOSOL2 (Wallonie, juin 2015) et des sites CARBIOSOL3 sont plus semblables ; le quotient microbien et le rapport C_{mic}/N_{mic} sont toutefois inférieurs sous les cultures échantillonnées pendant CARBIOSOL2. Notez que les axes définis montrent une grande variabilité entre sites agricoles wallons. L'ordre de grandeur des gammes dépend de l'indicateur biologique : il augmente dans l'ordre diversité fonctionnelle (un ordre de grandeur), rapport C_{mic}/N_{mic} , carbone microbien, quotient métabolique (deux ordres de grandeur), quotient microbien, respiration potentielle, vers de terre (trois ordres de grandeur) et minéralisation de l'azote (cinq ordres de grandeur). Une partie de la grande variabilité est due à la variabilité à petite échelle, au sein d'une même parcelle. Le prélèvement de plusieurs échantillons sur la même parcelle et le calcul de médianes par parcelle réduit l'amplitude des gammes de données (Tableau 7, Tableau 8)

La définition de valeurs de référence et la conception d'approche de synthèse des indicateurs biologiques restent des enjeux de l'utilisation des indicateurs biologiques pour l'évaluation de la qualité biologique du sol (Paz-Ferreiro et al., 2016). Des valeurs seuils ont été proposées pour les quotients écosystémiques (Anderson, 2003), mais la complexité de l'écosystème sol ne permet pas la définition de limites critiques pour la majorité des indicateurs biologiques. Afin d'interpréter les mesures d'indicateurs biologiques, plusieurs concepts ont été proposés : la comparaison de valeurs à un sol non-perturbé sous végétation climax (Alves de Castro Lopes et al., 2013; Gil-Sotres et al., 2005), des approches de 'plus est meilleur' (comme le score compréhensif proposé dans CARBIOSOL1) ou la comparaison à l'état dit 'normal'. Des gammes de valeurs normales pour certains indicateurs biologiques ont été publiées pour des sols français et néerlandais (Cluzeau et al., 2012; Rutgers et al., 2009). Rutgers et al. (2009) listent des moyennes ainsi que les valeurs les plus basses et les plus élevées pour différents types et utilisation de sol à l'échelle de fermes. Les gammes de valeurs publiées combinent des résultats de différentes campagnes de terrain, toutes effectuées de mars à juin. Les gammes pour les indicateurs biologiques en France sont exprimées en forme du premier et troisième quartile basées sur des données collectées pendant deux printemps (15 février au 15 avril) consécutifs (Cluzeau, 2012). Les données de ces deux réseaux incluent donc une certaine variabilité interannuelle.

Dans le projet CARBIOSOL, la question se pose si les données des diverses campagnes, spécifiquement de CARBIOSOL2 et 3, peuvent être combinées pour définir une seule gamme commune. Quelle que soit l'approche mathématique utilisée pour la définition d'une telle gamme, elle serait plus large qu'une gamme définie pour une seule campagne de terrain. De manière analogue à la combinaison de données de différentes saisons, la sensibilité de la détection de différences dues à des perturbations ou des pratiques de gestion serait par conséquent moins élevée.

Le prélèvement de plusieurs échantillons par parcelle peut permettre d'affiner des gammes et augmenter le pouvoir discriminatoire entre parcelles. Par contre, prélever quatre échantillons quadruple également le temps et le coût des analyses, tous les deux limitant dans un réseau de surveillance. Il se pose donc la question si une considération de plus de parcelles ou une meilleure précision des données de chaque parcelle échantillonnée est favorable dans le cadre de CARBIOSOL.

4. Relations entre fractions de carbone organique du sol et indicateurs biologiques

4.1. Matériels et méthodes

Mesures des indicateurs biologiques

Veillez-vous référer à la section 1.1.

Mesures des fractions stable et labile de COS

Les fractions stable (CO_stable) et labile (CO_labile) de carbone organique (fractions associées respectivement aux particules de sols inférieures à 20 μm et supérieures à 20 μm de diamètre) ont été séparées par fractionnement physique par tamisage humide. Les échantillons prélevés ont été préalablement séchés à l'air libre, délicatement broyés, et tamisés à 2 mm. Après homogénéisation de l'échantillon, 10 g ont été prélevés et mélangés à 100ml d'eau déionisée dans un récipient se fermant hermétiquement. Ensuite, l'échantillon était placé sur une table d'agitation (250 rpm) pendant 20 minutes afin de détruire les macro-agrégats. Après agitation, l'échantillon était tamisé par voie humide tout d'abord à 50 μm afin de faciliter l'étape suivante de tamisage à 20 μm (Figure 15). Les refus de tamis ont ensuite été placés dans une étuve à 60°C pendant 4 jours. Le liquide contenant les particules inférieures à 20 μm était passé en centrifugeuse (VWR MegaStar 600R) pendant 25 min à 3600 rpm. Ensuite le liquide clair surnageant était évacué, les culots récupérés et mis à l'étuve à 60°C pendant 4 jours minimum.



Figure 10: Illustration d'un tamisage par voie humide dans le protocole de fractionnement physique d'un échantillon de sols.

Une fois secs, les échantillons ont été testés pour la présence de carbonates (mesurée si résultat positif) et analysés pour leur teneur en carbone organique (procédures décrites en § 3.1).

La procédure de fractionnement étant chronophage, demandant la disponibilité d'une étuve, et les échantillonnages ayant eu lieu jusque tard au cours du projet (octobre 2016), tous les échantillons des 4 campagnes ne pouvaient être fractionnés. Ainsi, les échantillons de la première campagne ont tous été fractionnés, puis 4 sites ont été également fractionnés pour les campagnes 2 et 3. Ces 4 sites sont les sites 10 et 11 de l'asbl Regenacterre, et les sites 17 et 18 de l'essai à long terme

de Longtours du CRA-W (Figure 1). Ainsi, la variabilité temporelle de la mesure de la fraction stable a pu être analysée pour ces 4 sites pour 3 campagnes (avril, juin et août 2016). L'hypothèse posée étant que la fraction stable ne varie pas significativement d'une campagne à l'autre, et qu'ainsi les teneurs en fraction stable de la première campagne pourraient être utilisées également pour les 3 autres campagnes afin de déterminer la fraction labile, telle que :

$$COT = CO_stable + CO_labile \quad (6)$$

Avec : COT la teneur en carbone organique total, CO_stable la teneur en fraction de carbone stable et CO_labile la teneur en fraction de carbone labile, toutes exprimées en g C kg⁻¹ de sol (bulk).

4.2. Résultats et discussion

Teneurs en fractions stable et labile de carbone organique

La figure 11A permet de visualiser les mesures de la teneur en fraction stable (médiane, minimum et maximum) pour les sites 10, 11, 17 et 18 aux campagnes I, II et III : elles varient entre 5.5 g C kg⁻¹ (CI S17) et 8.7 g C kg⁻¹ (CII S11) de sol. Une ANOVA avec permutation (et imbrication des sites) a montré qu'il n'y avait pas d'effet du moment de prélèvement sur les teneurs en CO stable mesurées (df=2, p=0.60). Les teneurs en fraction stable ne sont pas significativement différentes d'une campagne à une autre pour chacun des quatre sites investigués (Figure 11 A). Bien que les teneurs en CO_stable apparaissent quelque peu plus élevées pour le site 10 lors de la campagne I en comparaison des campagnes II et III, cette différence reste inférieure au niveau de précision de la mesure de carbone par combustion à sec.

La teneur en fraction stable d'un site ne variant pas significativement d'une campagne à une autre, la variabilité intra-site du CO_stable a été estimée pour chacun de ces sites sur base des données des campagnes I, II et III (soit n=12 par site, Tableau 9). La variance intra-site de la mesure est très faible, entre 0.14 et 0.20 g C kg⁻¹, et le coefficient de variation apparaît inférieur à 8% (CV = 7.71% au site 10, site de 'contrôle'). Le CO_stable présente en effet des variabilités intra- et inter-sites (Figure 11A) bien moindres que celles du COT (Figure 11B) et celles de la fraction labile (Figure 11C). Il apparaît évident d'après la figure 11, que la variabilité de la fraction labile est responsable de la majeure partie de la variabilité du COT, comme a pu l'observer Trigalet et al. en 2014 sur les sites du CRA-W de Longtours. La figure 11 appuie ainsi l'importance d'étudier les variations spatiales et temporelles à long terme de la fraction stable, et non celles du carbone organique total, afin de pouvoir plus aisément détecter des changements significatifs de la qualité du sol à l'échelle régionale, souvent masqués par la variabilité liée au CO_labile dans le COT.

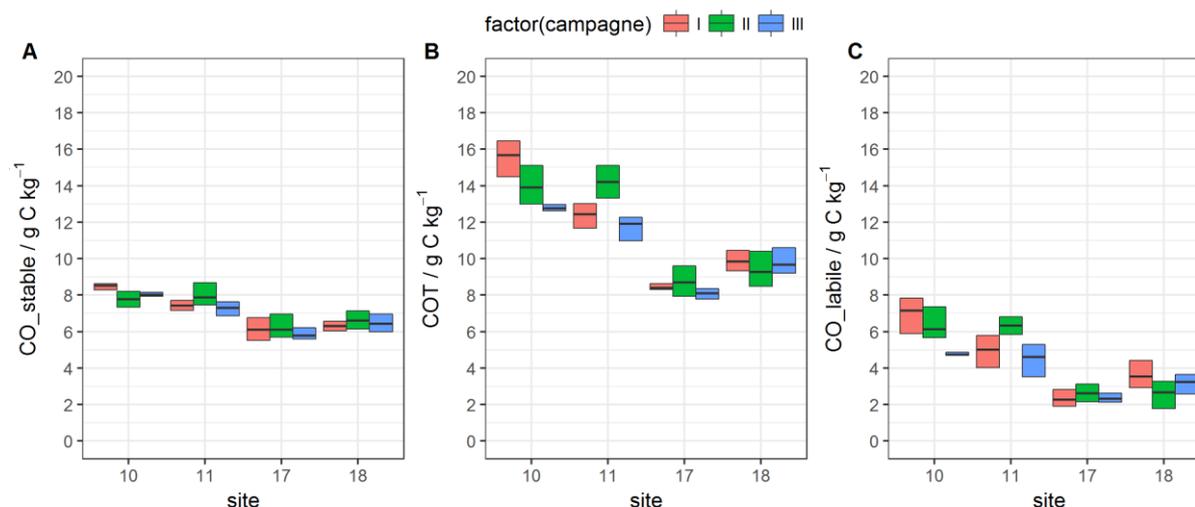


Figure 11 : Teneurs minimum, moyenne et maximum en carbone organique stable (A), total (B) et labile (C) pour les sites 10, 11, 17 et 18 lors des campagnes I, II et III.

Tableau 9 : Moyennes et mesures de variabilité (variance et coefficient de variation) des teneurs en fraction stable mesurées sur les sites 10, 11, 17 et 18 sur base des campagnes I, II et III (n= 12 par site).
* CV (coefficient de variation = écart type / moyenne * 100)

Site	10	11	17	18
Traitement	semis direct	TCS Claydon	conventionnel	Pailles + CIPAN
CO_stable (g C / kg)				
moyenne	8.12	7.53	6.00	6.45
variance	0.15	0.20	0.21	0.14
CV (%)*	4.82	5.98	7.71	5.77

En s'appuyant sur la non-significativité des variations inter-saisons et la faible variabilité intra-site de la teneur en CO_stable, la valeur moyenne mesurée à chaque site lors de la première campagne fût utilisée pour déterminer les teneurs en fraction labile pour les campagne II, III et IV (excepté pour chacun des sites 10, 11, 17 et 18 où c'est la moyenne de CO_stable mesurée sur les campagnes I, II et III qui fut utilisée ; Tableau 9).

La Figure 12 présente les valeurs moyennes de CO_stable mesurées pour l'ensemble des sites étudiés au cours de ce projet CARBIOSOL III (les 7 sites dits de « contrôle » - sous agriculture conventionnelle - et les 4 sites sous « gestion de conservation »), ainsi que les données de CO_labile déduites comme expliqué ci-dessus. Les teneurs moyennes en CO_stable varient entre 5.92 g C kg⁻¹ au site 3 et 8.50 g C kg⁻¹ au site 2, tous deux des sites de contrôle. La Figure 12, à première vue, ne montre pas de différences entre teneurs en CO_stable mesurées aux sites de contrôle et celles mesurées aux sites soumis à des pratiques de conservation de sol. Comme le montre la Figure 13, la fraction stable dépend avant tout des conditions pédologiques (la teneur en argiles et limons fins) mais également de l'occupation de sols (cultures ou prairies sur le long terme). L'ensemble des données de

fractionnement que nous possédons sur cultures en Wallonie mais également en Bavière (source : M. Wiesmeier) pour des parcelles, a priori, toutes sous pratiques conventionnelles ont été utilisées pour tracer une régression entre teneur en CO stable et teneur en argiles et limons fins. Parmi les traitements étudiés ici, les sites 10, 11 et 6 (en semis direct, TCS Claydon et agriculture biologique, respectivement), qui sont en non-labour ou labour occasionnel depuis quelques années, se situent juste au-dessus de cette droite de régression liée aux sites de contrôle. Les mesures associées à la parcelle 18 (site du CRA-W sous labour conventionnel mais avec restitution des pailles + CIPAN) reste en dessous de la droite, dans la normal des observations faites en Wallonie pour des sites dits conventionnels. Les sites 17 et 18 sont accolés (même sol), sont gérés de la même façon en ce qui concerne le travail du sol, mais le site 18 se voit restituer ses pailles et est cultivé en CIPAN. Comme Trigalet et al. (2014) a pu l'observer, les teneurs moyennes en CO_stable des sites 17 et 18 diffèrent peu, malgré une teneur légèrement plus élevée pour le site 18 (6.45 g C kg^{-1}) face au site de contrôle 17 (6.00 g C kg^{-1} ; Figure 12). Ces observations corroborent celles de Buysse et al. (2013) qui ont mis en évidence, sur ce même essai à long terme de Longtours, une influence non-significative du traitement P&CIPAN sur les stocks de COT entre 1959 et 2010.

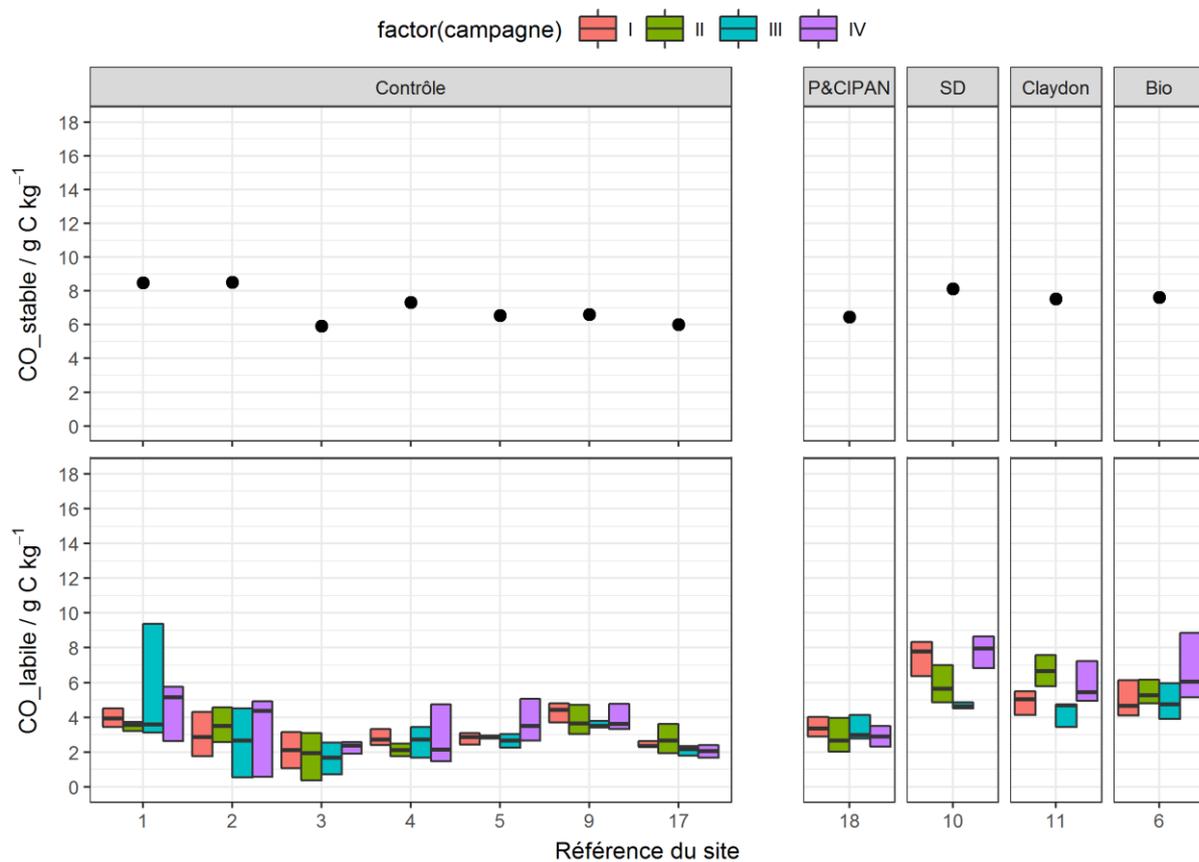


Figure 12 : Teneurs moyennes en CO stable (en haut) qui, soustraites au COT, permettent d'obtenir les teneurs en carbone labile (en bas ; valeurs minimum, moyenne et maximum) pour les 11 sites étudiés au cours du projet CARBIOSOL III.

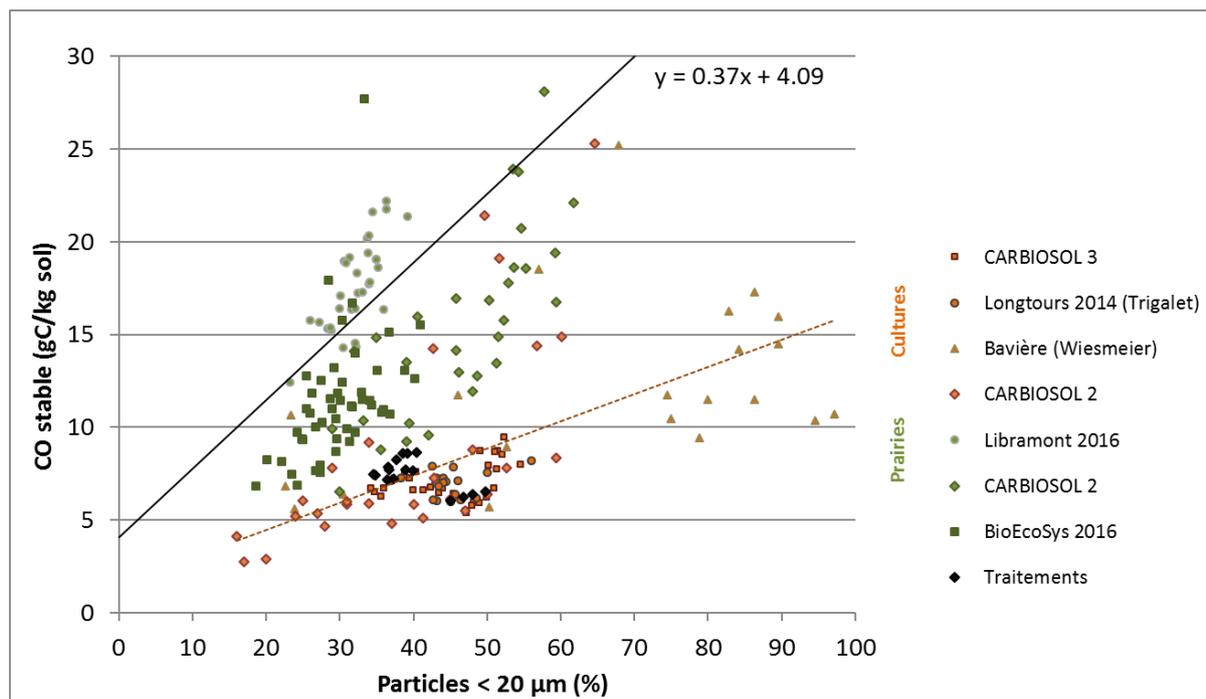


Figure 13 : Mesures des teneurs en carbone organique stable en fonction des teneurs en argiles et limons fins pour des sols wallons sous cultures et prairies. La droite de Hassink (en noir) correspond au maximum du potentiel de stockage de fraction stable pour un sol minéral. La droite orange est une régression se basant sur des parcelles, a priori, de ‘contrôle’, c’est-à-dire sous pratique conventionnelle.

Les teneurs en CO_{labile} varient entre 0.38 et 9.37 g C kg⁻¹ (Figure 12). Les résultats d’une ANOVA avec permutation et imbrication des sites (df=3 ; p=0.15) démontre qu’il n’existe pas de différence significative d’une saison/campagne à une autre. Malgré cela, les sites sous gestions de conservation, notamment les sites 10, 11 et 6, en non-labour ou labour occasionnel (contrairement au site 18), ont toutefois des teneurs en CO_{labile} supérieures à celles observées pour les sept parcelles de contrôle.

L’ensemble de ces résultats tendent à souligner l’influence des pratiques de conservation, et notamment la réduction du travail du sol, sur la ‘protection’ de la fraction ‘active’ (le CO_{labile}) du carbone organique du sol face à la minéralisation, et de ses répercussions sur la fraction stable.

Corrélations entre fractions de CO et indicateurs biologiques

Les corrélations entre indicateurs biologiques et indicateurs chimiques sont étudiées par moment d’échantillonnage et au niveau de la parcelle (moyenne des quatre échantillons), ce qui permet de réduire la variabilité. Les corrélations à travers l’ensemble les quatre moments d’échantillonnage (Tableau 10) sont généralement moins bonnes que celles calculées pour un moment d’échantillonnage unique. Les corrélations calculées (Tableau 11 -

Tableau 14) confirment les résultats de CARBIOSOL2 que le carbone microbien et la respiration potentielle sont les deux indicateurs biologiques montrant les meilleures corrélations avec les indicateurs chimiques, et que les corrélations avec le carbone (COT, fraction labile et carbone extrait à l’eau chaude) sont meilleures que celles avec le pH du sol. Les liens entre carbone microbien et les fractions chimiques de carbone sont visualisés par moment d’échantillonnage dans la Figure 13. Des

tableaux présentant les corrélations entre indicateurs chimiques et entre indicateurs biologiques se trouvent en Annexe 6.

Tableau 10 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques et biologiques (quatre moments d'échantillonnage, n=44). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	Quotient métabolique	Respiration potentielle	Minéralisation nette de l'azote	Vers de terre	Diversité fonctionnelle	C_{mic}/N_{mic}	Quotient microbien	Carbone microbien
pH _{H2O}	-0.21	-0.21	0.03	-0.14	0.18	0.17	0.15	0.09
pH _{KCl}	-0.08	-0.11	0.13	-0.09	0.16	0.01	0.20	0.24
COT	-0.18	0.54	0.32	0.42	0.04	-0.32	0.32	0.77
CO _{labile}	-0.21	0.57	0.33	0.47	0.04	-0.36	0.32	0.75
C eau froide	-0.11	0.75	0.04	0.12	0.15	0.25	0.52	0.45
C eau chaude	-0.31	0.57	0.31	0.26	-0.07	-0.19	0.50	0.76
N eau froide	0.06	-0.11	0.15	0.05	-0.42	-0.58	-0.07	0.11
N eau chaude	-0.36	0.17	0.37	-0.01	-0.17	-0.39	0.27	0.52

Tableau 11 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques et biologiques (échantillons d'avril, n=11). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	Quotient métabolique	Respiration potentielle	Minéralisation nette de l'azote	Vers de terre	Diversité fonctionnelle	C_{mic}/N_{mic}	Quotient microbien	Carbone microbien
pH _{H2O}	0.14	-0.11	-0.11	-0.32	0.70	0.55	0.35	0.14
pH _{KCl}	-0.03	0.03	-0.02	-0.18	0.63	0.29	0.49	0.38
COT	-0.64	0.87	-0.05	0.73	0.09	-0.58	0.37	0.83
CO _{labile}	-0.71	0.92	-0.02	0.89	0.03	-0.70	0.34	0.79
C eau froide	-0.81	0.86	-0.18	0.82	0.01	-0.60	0.10	0.55
C eau chaude	-0.63	0.90	0.09	0.84	-0.08	-0.54	0.53	0.87
N eau froide	-0.02	0.11	0.05	0.30	-0.47	-0.41	-0.04	0.06
N eau chaude	-0.57	0.85	0.11	0.79	-0.07	-0.47	0.59	0.89

Tableau 12 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques et biologiques (échantillons de juin, n=11). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	Quotient métabolique	Respiration potentielle	Minéralisation nette de l'azote	Vers de terre	Diversité fonctionnelle	C _{mic} /N _{mic}	Quotient microbien	Carbone microbien
pH _{H2O}	-0.48	0.12	0.47	0.19	0.18	0.31	0.40	0.38
pH _{KCl}	-0.44	0.08	0.41	0.02	0.12	0.36	0.39	0.39
COT	-0.40	0.81	0.40	0.57	-0.26	-0.15	0.59	0.92
CO_labile	-0.30	0.89	0.30	0.72	-0.20	-0.31	0.53	0.84
C eau froide	-0.78	-0.04	-0.03	0.04	0.08	0.69	0.61	0.42
C eau chaude	-0.17	0.89	0.20	0.65	-0.28	-0.33	0.56	0.81
N eau froide	-0.19	0.17	0.24	0.41	0.00	-0.10	0.11	0.22
N eau chaude	-0.24	0.80	0.22	0.54	-0.39	-0.37	0.49	0.78

Tableau 13 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques et biologiques (échantillons d'août, n=11). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	Quotient métabolique	Respiration potentielle	Minéralisation nette de l'azote	Vers de terre	Diversité fonctionnelle	C _{mic} /N _{mic}	Quotient microbien	Carbone microbien
pH _{H2O}	-0.06	-0.36	0.41	0.04	0.07	0.41	0.27	0.17
pH _{KCl}	-0.07	-0.18	0.46	0.06	0.20	0.37	0.36	0.32
COT	-0.17	0.45	0.20	0.39	-0.23	-0.43	0.25	0.66
CO_labile	-0.34	0.55	0.15	0.42	-0.13	-0.50	0.21	0.59
C eau froide	-0.16	0.95	0.19	-0.03	0.28	0.08	0.63	0.62
C eau chaude	-0.14	0.86	-0.04	0.26	-0.08	-0.26	0.52	0.73
N eau froide	-0.16	0.08	0.40	-0.06	0.12	-0.17	-0.01	0.25
N eau chaude	-0.28	0.94	0.21	0.14	0.04	-0.13	0.71	0.87

Tableau 14 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques et biologiques (échantillons d'octobre, n=11). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	Quotient métabolique	Respiration potentielle	Minéralisation nette de l'azote	Vers de terre	Diversité fonctionnelle	C _{mic} /N _{mic}	Quotient microbien	Carbone microbien
pH _{H2O}	-0.51	-0.41	-0.30	-0.53	0.18	-0.27	-0.30	-0.30
pH _{KCl}	-0.20	-0.09	-0.08	-0.19	0.42	-0.43	-0.13	-0.00
COT	0.56	0.78	0.79	0.51	0.58	-0.37	0.36	0.79
CO _{labile}	0.64	0.86	0.82	0.58	0.56	-0.13	0.51	0.86
C eau froide	0.66	0.93	0.76	0.82	0.16	0.01	0.75	0.92
C eau chaude	0.71	0.92	0.93	0.59	0.16	-0.17	0.72	0.94
N eau froide	0.15	0.44	0.20	0.44	-0.02	-0.37	0.48	0.50
N eau chaude	0.73	0.90	0.92	0.50	0.12	-0.17	0.72	0.92

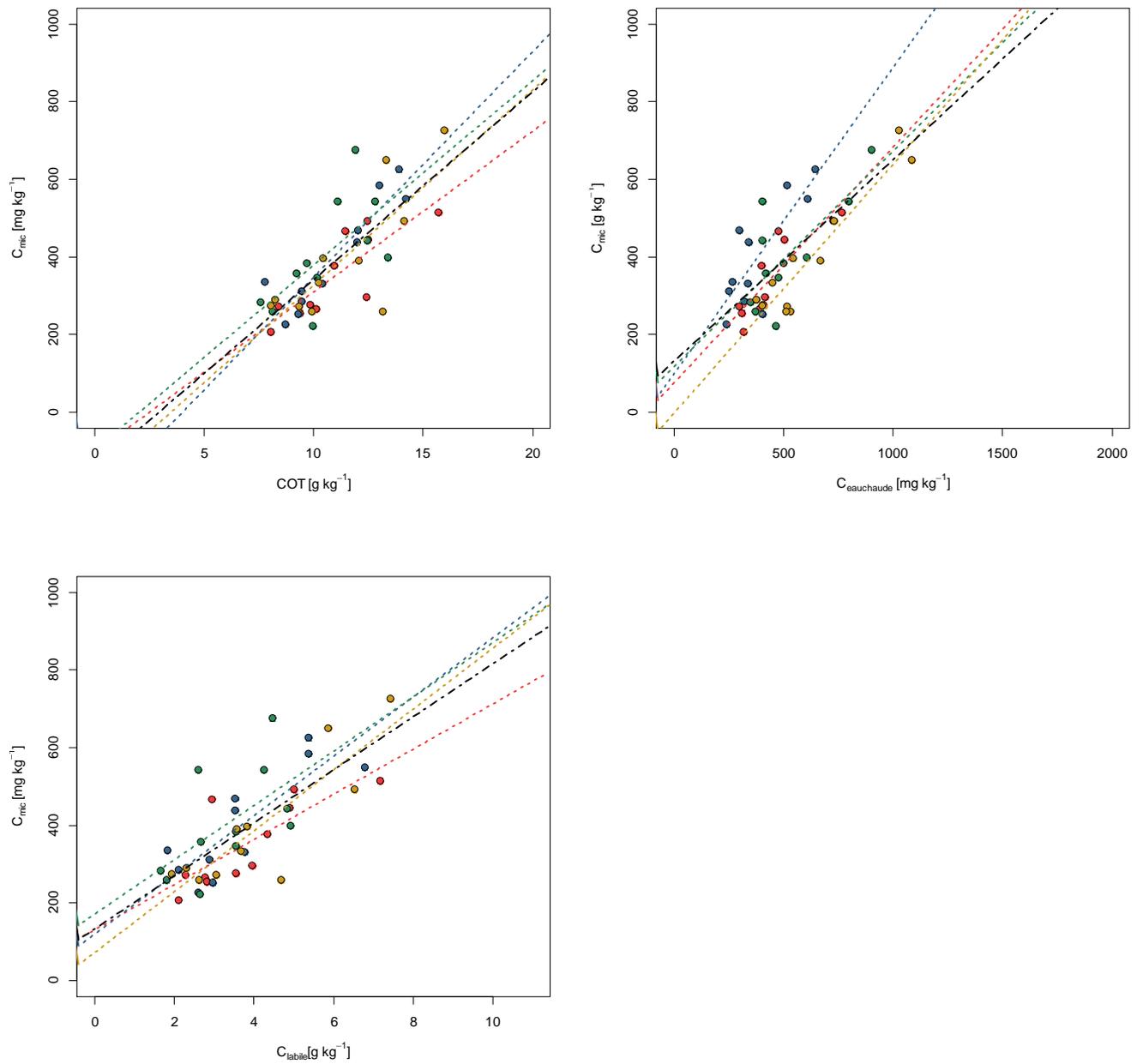


Figure 13 : Liens carbone microbien et carbone organique total, carbone dans la fraction labile et carbone extrait à l'eau chaude pour les quatre moments d'échantillonnage (Echantillonnage I en rouge, Echantillonnage II en bleu, Echantillonnage III en vert et Echantillonnage IV en jaune).

5. Analyse de faisabilité de mesure des fractions de matière organique par spectrométrie infrarouge

Depuis plus de 40 ans, le CRA-W a développé une importante expertise en termes d'analyse Spectroscopique Proche Infra-Rouge (SPIR), avec l'acquisition successive de différentes machines, la mise au point de l'analyse des fourrages, et la mise en routine de ces analyses dans les laboratoires provinciaux. En 1994, la première convention-cadre ayant pour base l'utilisation du SPIR pour l'analyse de productions agricoles est accordée à l'ASBL REQUASUD. Récemment, REQUASUD met en service l'analyse des sols par SPIR. C'est dans ce cadre que nous collaborons avec le laboratoire de Tinlot afin de tester la faisabilité de la mesure des fractions de CO par SPIR. Ces mesures permettraient ainsi l'apport d'informations supplémentaires aux agriculteurs et particuliers quant à la qualité de leurs sols (fraction active du sol, déduction d'indicateurs biologiques, déficit de saturation en carbone...).

(Pour plus de détails concernant l'utilisation du SPIR par REQUASUD, veuillez-vous référer au document suivant : http://www.requasud.be/img/article/Spectrometrie_proche_infrarouge.pdf).

Matériels et méthodes

Echantillons de sols

Cette étude s'est basée sur l'analyse d'échantillons de sol prélevés en cultures et prairies dans le cadre du précédent projet CARBIOSOL II, de ce projet CARBIOSOL III, et d'un stage en collaboration avec le CRA-W (Stagiaire : John STAINIER). Au total, 74 échantillons de sols sous cultures et 62 échantillons de sols sous prairies ont été fractionnés et analysés par spectroscopie proche infra-rouge (SPIR).

Fractionnement de COS et mesures carbone

Pour chacun des échantillons cités ci-dessus, un aliquote de 10 g a été fractionné pour détermination des fractions stable (CO_stable) et labile (CO_labile) de carbone organique (fractions associées respectivement aux particules de sols inférieures à 20 µm et supérieures à 20 µm de diamètre) suivant le protocole présenté en §4.1. Une fois secs, les échantillons <20 µm ont été testés pour la présence de carbonates (mesurée si résultat positif) et analysés pour leur teneur en carbone organique (procédures décrites en §3.1) dont a été déduite la teneur en CO_stable de l'échantillon d'origine (échantillon bulk). En parallèle, la teneur en COT de l'échantillon bulk fut mesurée, comme décrit en §3.1, et la teneur en CO_labile déduite des mesures de COT et CO_stable.

Analyses par Spectrométrie Proche InfraRouge, et estimation du COT et CO_stable

Les rayonnements proche infrarouge (correspondant aux longueurs d'ondes comprises entre 780 et 2500 nm) ont la particularité de faire vibrer les liaisons chimiques des molécules organiques. En fonction du composant organique (protéines, matières grasses, ...), les interactions sont plus ou moins fortes avec le rayonnement proche infra-rouge, conférant à chacun de ces composants un spectre d'absorption spécifique du proche infra-rouge. Ainsi, selon sa composition, une matière d'origine organique va donc révéler un spectre propre, une sorte de signature de sa composition.

Les analyses par SPIR ont été effectuées au laboratoire de Tinlot sur un appareil XDS Rapid Content Analyzer (FOSS NIR Systems Inc., Laurel, MB, USA) décomposant la lumière dans la gamme de

longueurs d’onde 400-2500 nm, et doté du logiciel ISIScan qui effectue les tests diagnostic et la mise en forme numérique des résultats. Ces analyses ont été effectuées sur un aliquot d’environ 120 g de chaque échantillon.

La librairie spectrale ainsi obtenue (n=74 en cultures et n=62 en prairies) a alors été associée aux mesures de COT et CO_stable afin de calibrer et cross-valider des modèles prédictifs pour ces mêmes teneurs en CO. La précision des différents modèles a été testée (en cross-validation) par calcul de l’erreur quadratique moyenne (ou RMSE), telle que (Eq. 7) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (7)$$

Avec \hat{y}_i la valeur prédite de l’observation i du jeu de validation, y_i la valeur observée et n le nombre d’observations du jeu de validation. Nous avons aussi calculé le RPD, c'est-à-dire le rapport de l’écart type (SD) sur l’erreur de prédiction (RMSE ; Eq. 8) :

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \quad (8)$$

Un RPD supérieur à 2 tend à désigner un modèle de bonne qualité.

Résultats et discussion

Teneurs en carbone organique (COT et CO_stable)

Le Tableau 15 présente les statistiques descriptives des teneurs en COT et CO_stable mesurées dans l’ensemble des échantillons analysés par SPIR et constituant la base de la librairie spectrale de CARBIOSOL. Sur l’ensemble des échantillons, les teneurs en COT et CO_stable varient entre 7.00 et 54.50 g C kg⁻¹ et entre 2.73 et 28.1 g C kg⁻¹, respectivement. Les teneurs moyennes en COT (écart-type) sont de 13.01 (6.46) g C kg⁻¹ en cultures et de 40.38 (7.64) g C kg⁻¹ en prairies, et sont significativement différentes (t-test non apparié ; p<0.01). De même, les teneurs moyennes en CO_stable en cultures (7.73 (3.60) g C kg⁻¹) sont significativement différentes (t-test non apparié ; p<0.01) des teneurs moyennes en prairies (16.59 (3.99) g C kg⁻¹). La part de CO_stable relative au COT varie entre 12.95 et 83.88%, avec une moyenne (écart-type) de 60.87 (12.16) % en cultures et 42.54 (12.74) % en prairies (significativement différent – p<0.01 - d’après un t-test non-apparié ; Figure 14). La part de CO_stable dans le COT n’étant pas constante, l’estimation du CO_stable est donc bien indépendante de celle du COT. Des modèles prédictifs des teneurs en COT et CO_stable ont donc été indépendamment ajustés sur les données issues de sols sous cultures et sur les données issues de sols sous prairies.

Tableau 15 : statistiques descriptives des teneurs en COT et CO_stable observées du jeu de données utilisé pour la calibration des modèles d’estimation de ces teneurs sur base de l’analyse spectrométrique infrarouge (SPIR).

Occupation de sol	Type de carbone organique	Statistiques descriptives (g C/kg)						
		n	min	Q1	Med.	Moy.	Q3	max
Cultures	COT	74	7.00	9.70	11.70	13.01	13.00	43.10
	CO_stable		2.73	6.04	6.77	7.73	8.00	25.29
Prairies	COT	62	18.80	37.77	41.70	40.38	45.10	54.50
	CO_stable		6.54	14.47	16.71	16.59	19.05	28.11

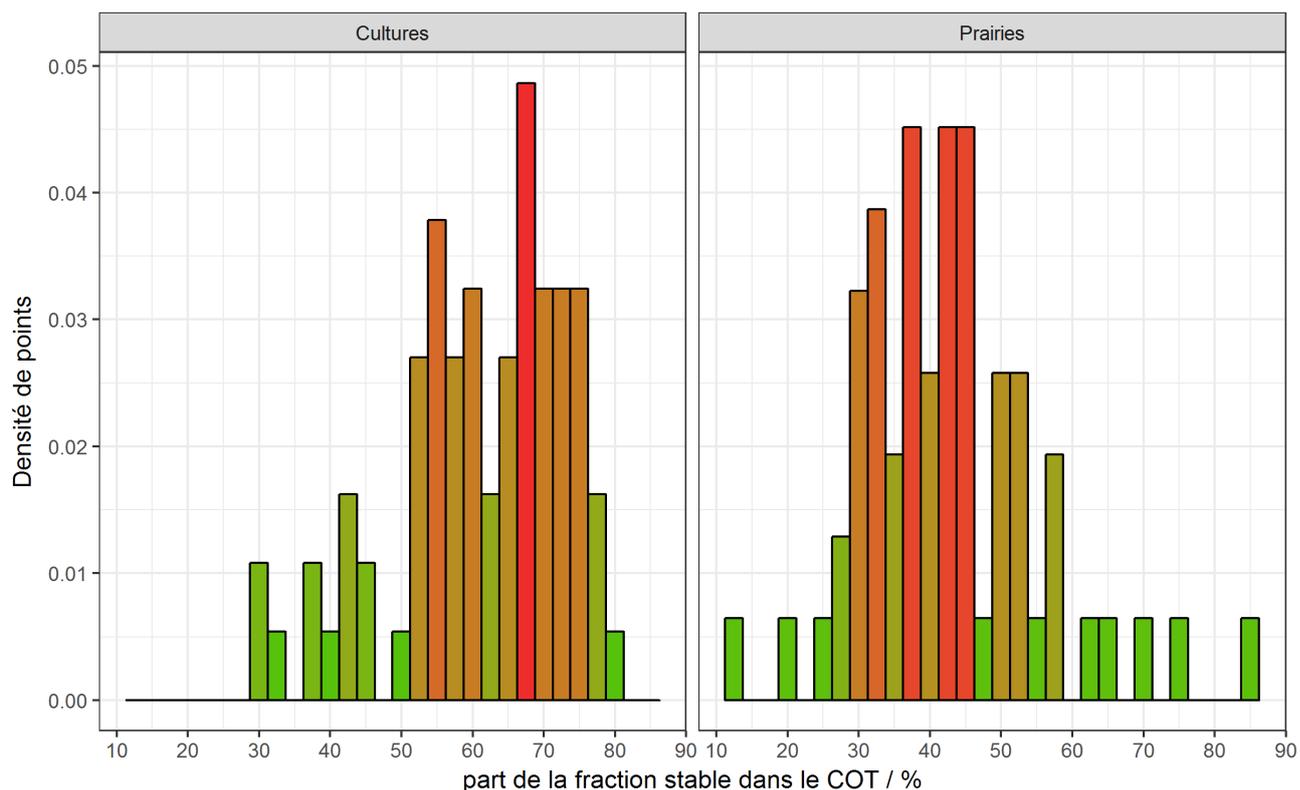


Figure 14 : Histogrammes des pourcentages de fraction stable (CO_stable) contenue dans le COT pour les échantillons de cultures (à gauche) et de prairies (à droite).

Modèles calibrés et pouvoir prédictif

Le Tableau 16 présente les résultats de validation croisée pour les modèles ajustés s'étant révélés les plus performants en termes de prédiction des teneurs en COT et CO_stable pour les échantillons issus de cultures et prairies de la base de données. Les modèles calibrés sur base des échantillons de cultures apparaissent de bonne qualité avec des RPD supérieures à 2 (2.04 pour le modèle d'estimation du COT et 2.08 pour le modèle d'estimation du CO_stable). La RMSE est de 1.73 g C kg^{-1} pour la fraction stable en cultures (rappel : moyenne de $7.73 (3.60) \text{ g C kg}^{-1}$). Le modèle apparaît très performant pour l'estimation des teneurs en CO_stable inférieures à 10 g C kg^{-1} (Figure 15 - gauche). Il existe peu d'échantillons avec une valeur observée de CO_stable supérieure à 10 g C kg^{-1} en cultures ; valeurs pour lesquelles le modèle est alors moins performant et participe pour beaucoup à la RMSE calculée. En ce qui concerne les modèles calibrés sur des échantillons de prairies, leur qualité est inférieure à la qualité des modèles ajustés pour les cultures, avec des RPD inférieurs à 1.2 (Tableau 16). Bien qu'il n'apparaisse pas de biais dans l'estimation des teneurs en CO_stable pour les prairies (Figure 15 – droite), le nuage de points créés par les valeurs prédites face aux valeurs observées est fort dispersé autour la droite 1 :1.

Ces résultats sont très encourageants concernant l'estimation de la fraction stable de CO en cultures par SPIR. Il apparaît tout de même important d'analyser par la suite des échantillons permettant de mieux couvrir la gamme de valeurs observées et de spectres associés afin d'améliorer les performances de prédiction et ainsi répercuter des erreurs minimales dans l'estimation de la fraction labile déduite (rappel : $CO_labile = COT - CO_stable$).

Tableau 16 : Estimation du COT et CO_stable d'après l'analyse spectroscopique (SPIR, laboratoire de Tinlot) : résultats des validations croisées pour les modèles montrant les meilleurs résultats en terme de pouvoir prédictif.

	Tous les échantillons			Cultures			Prairies		
	Transf.	RMSE*	RPD	Transf.	RMSE*	RPD	Transf.	RMSE*	RPD
COT	R	5.20	2.93	abs	3.15	2.04	d1	6.50	1.17
CO_stable	abs	2.90	1.99	abs	1.73	2.08	d1	3.50	1.13

* en gC/kg se sol total (bulk)

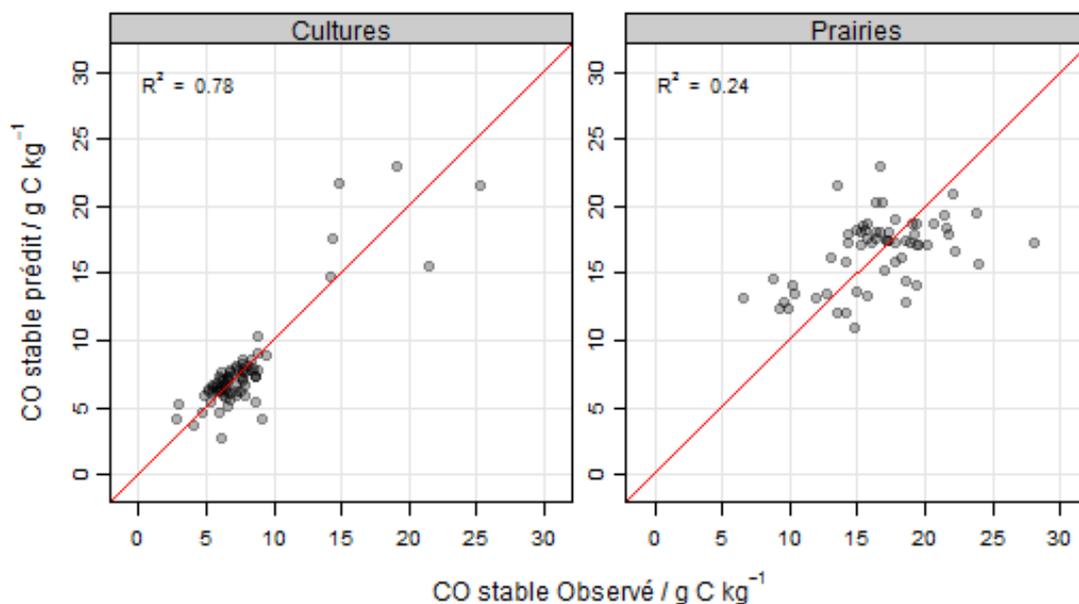


Figure 15 : Estimation des teneurs en CO_stable d'après l'Analyse Spectroscopique Proche InfraRouge (SPIR, laboratoire de Tinlot) : plots des valeurs prédites face aux valeurs observées pour les cultures (à gauche) et les prairies (à droite). En rouge, la droite 1 :1.

6. « Automatisation » de la cartographie du carbone organique du sol sur base des données de Requasud

Dans le cadre du projet CARBIOSOL I, une méthode de cartographie du COT à l'échelle de la Wallonie a été mise au point et appliquée successivement aux teneurs (g C kg^{-1} ; Chartin et al., 2015) puis aux stocks de COT (Mg C ha^{-1} ; Chartin et al., In Press) mesurés dans le cadre du réseau de mesure de la qualité des sols CARBOSOL. Les résultats obtenus via cette méthode se sont révélés de meilleures qualités que les précédentes méthodes cartographiques testées en Wallonie, et permet de plus clairement identifier les principaux facteurs environnementaux responsables de la variabilité spatiale du COT. Cette méthode cartographique a été implémentée dans des scripts informatiques pour le logiciel R (<https://www.R-project.org>), et est ainsi aisément reproductible quand cela s'avère nécessaire (intégration de nouvelles données par exp.).

Au cours du projet CARBIOSOL II (Kruger et al., 2015), un test de coordination des réseaux de mesures de la qualité des sols agricoles wallons CARBOSOL et REQUASUD s'est révélé positif. Le réseau de mesure REQUASUD créé en 1989 regroupe un réseau de laboratoires agréés délivrant, entre autres, un service d'analyse du sol aux professionnels de l'agriculture. Chaque année, des milliers d'échantillons de sols agricoles sont analysés à travers toute la Wallonie par le biais de REQUASUD. Le réseau de mesure REQUASUD a développé depuis 2003 un système de géoréférencement de ces points d'analyse qui permet désormais l'application de méthode d'analyse spatiale telle que celle développée pour la cartographie du COT dans CARBIOSOL. La base de données REQUASUD est donc riche d'une forte densité d'observations (contrairement au réseau CARBOSOL ; $n=592$) et d'un apport continu de ces observations. De ce fait, des procédures de mise à jour « automatiques » des cartes de teneurs en COT sur base des données REQUASUD et de la méthode cartographique développée dans le projet CARBIOSOL confèreraient un atout majeur pour améliorer la détection de tendances spatiales et temporelles du COT, et donc de changement de la qualité des sols agricoles. La méthode cartographique implémentée sous forme de scripts informatiques R au cours des précédents volets de ce projet a donc été testée sur les données de REQUASUD et adaptée en conséquence.

Matériels et méthodes

Données

Les données d'entrée correspondent aux teneurs en COT* mesurées par le réseau de laboratoires REQUASUD dans le cadre des analyses de terres effectuées à la demande des agriculteurs. Seules les données géoréférencées (depuis 2003) ont été prises en compte, car elles seules peuvent être utiles à la méthode de modélisation choisie (Cf. section suivante). Le sol de chaque parcelle est prélevé selon un échantillonnage composite effectué sur l'horizon de surface sur l'ensemble de la parcelle diagnostiquée/testée.

(Pour des raisons de confidentialité, les données ayant servies pour la phase d'adaptation des scripts ont été modifiées par l'application d'un coefficient qui nous était inconnu. Ceci nous a donc permis de conserver les mêmes tendances concernant les variabilités spatiales et temporelles de la base de données réelle.)*

Modèles GAM et co-variables environnementales

La méthodologie de cartographie utilisée dans cette étude reste identique à celle développée au cours du projet CARBIOSOL I (Chartin et al., 2015). Elle s'appuie sur le principe de Digital Soil Mapping (DSM) qui consiste à modéliser la variabilité spatiale d'un paramètre cible du sol sur base des relations existantes entre ce paramètre et des co-variables environnementales connues pour influencer le développement/la nature des sols, et disponibles sous un format continu dans l'espace (couches vectorielles ou rasters ; McBratney et al., 2003). Ainsi de nombreuses co-variables relatives au relief, type de sols, climat, ou bien encore l'activité humaine ont été sélectionnées pour être intégrées dans le processus. Les couches de co-variables ont été ici re-générées sur une maille de 90m*90m, calées sur la couche SRTM de la NASA (www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1). Le choix de cette taille de maille, par rapport à une maille de 40m utilisée précédemment dans CARBIOSOL, relève de la représentativité de la donnée observée (une valeur de COT pour une parcelle) et du temps de calcul.

Une analyse des relations entre variable cible et co-variables environnementales permet ensuite d'affiner l'ajustement d'un modèle GAM (Generalised Additive Model ; Trever & Tibshirani, 1986) pour chacune des occupations de sols considérées (cultures et prairies). Un modèle GAM est une généralisation du modèle de régression multiple et consiste à préserver la nature additive du modèle mais en remplaçant les coefficients par des fonctions de lissage des co-variables. Ces fonctions permettent de prendre en compte le caractère non-linéaire de la relation qu'il peut y avoir entre la variable dépendante (ici COT) et les co-variables. Pour estimer la qualité des modèles, la RMSE et le RPD ont été calculés (Cf. § 5.1.3, Eq. 7 et 8). Une fois le modèle validé, il est appliqué à l'ensemble des couches continues des co-variables environnementales impliquées dans le modèle afin d'obtenir une représentation en continu de la variabilité du COT. En complément, des cartes des erreurs standards induites par la modélisation et du coefficient de variation sont produites pour une meilleure interprétation de la carte finale de COT.

Pour plus de détails concernant cette méthodologie cartographique, veuillez-vous référer au rapport de projet CARBIOSOL I (Chartin et al., 2015).

Scripts informatiques

Trois scripts informatiques R ont été construits sur base de la méthodologie de cartographie présentée ci-dessus, et adaptés pour la base de données REQUASUD beaucoup plus dense :

- un premier script permet de constituer la base de données pour l'analyse spatiale (choix des périodes à analyser, projection des points, extraction des co-variables) et d'effectuer une analyse exploratoire afin d'optimiser les étapes suivantes ;
- un second script permet de constituer les jeux de données de calibration et de validation, et d'ajuster, puis valider un modèle GAM (Modèle Additif Généralisé), et de créer la couche spatialisée associée, pour chacune des grandes occupations de sols (cultures et prairies) ;
- un dernier script permet d'associer les différentes couches dans l'espace selon le respect de la localisation des différentes occupations de sols afin d'obtenir une seule couche, et d'éditer si besoin un document 'propre' (carte + légende + logo + source) pour une première visualisation des résultats. L'utilisateur peut par la suite, à sa guise, exporter la couche raster finale vers le logiciel qu'il utilise habituellement pour l'édition de cartes à des fins de publication (ArcGis, SAGA ou autres SIG).

Un manuel d'utilisation des scripts est adapté au fur et à mesure de la modification/amélioration des scripts. Les scripts ayant le potentiel d'être modifiés au gré de leur utilisation dans CARBIOSOL IV, la version actuelle du manuel n'est pas définitive.

Résultats et discussion

Densité d'observations : inégalités spatiale, temporelle et inter-occupation de sols

Sur la période 2003-2014, un total de 44189 observations de teneurs en COT a été géoréférencé par REQUASUD dans les limites de la Wallonie. Une grande disparité existe entre cultures et prairies, avec environ 87% du total des observations faites en cultures et 13% en prairies. Le nombre d'observations géoréférencées annuellement par occupation de sol augmente plus ou moins régulièrement depuis 2003 (Figure 16). Les observations géoréférencées sont tout d'abord concentrées en région Sablo-limoneuse et dans le centre de la région Limoneuse, puis au fil des années, des observations sont géoréférencées sur l'ensemble du territoire wallon. On note ces dernières années une forte concentration des observations sous cultures dans les régions agricoles dominées par des systèmes d'exploitation intensive (régions Limoneuse, Sablo-limoneuse et Condroz). Ces disparités et évolutions peuvent être expliquées par une mise en place graduelle d'un géoréférencement systématique des sites qui peut différer d'une équipe d'échantillonnage à une autre, et l'évolution de la demande d'analyses de terres.

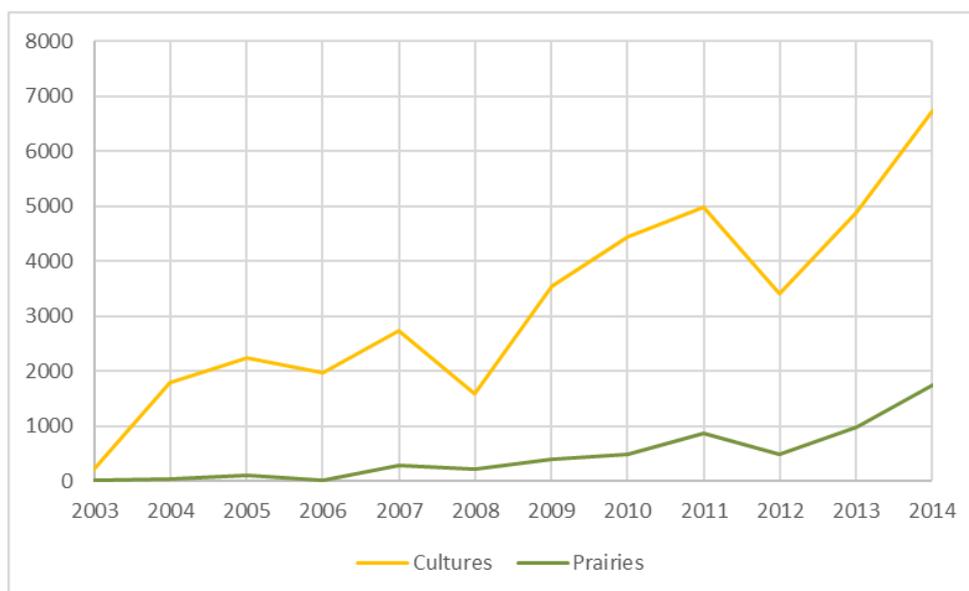


Figure 16 : Evolution du nombre d'observations géoréférencées de COT dans la base de données REQUASUD pour les cultures et les prairies entre 2003 et 2014.

La Figure 17 propose des exemples graphiques de résultats de validation et calibration de modèles GAM pour les sols sous cultures se basant sur **les données corrigées d'un coefficient inconnu** : veuillez donc considérer les tendances évolutives pour la RMSE et non les valeurs absolues présentées. On observe que plus le nombre de données et d'années considérées augmente plus on perd de pouvoir explicatif de la variance observée (baisse du R^2), la qualité du modèle diminue (baisse

du RPD) et la RMSE tend à augmenter (de 0.8 à 1 sur le jeu de calibration, soit +25%). Ceci apparaît à première vue contre-intuitif. Pourtant, l'augmentation du nombre d'observations et d'années d'observation considérées implique l'augmentation du nombre de parcelles investiguées ainsi que le nombre de cultures et de pratiques de gestions associées (influencent la fraction labile du CO). La variabilité intra- et inter-annuelle liée aux conditions climatiques va également augmentée (influence la fraction labile également). De plus, en augmentant le nombre d'années d'observation, on multiplie le risque d'avoir plusieurs observations pour une même parcelle : ces observations peuvent varier selon les conditions climatiques et la culture/gestion, et donc le modèle sera confronté à plusieurs valeurs pour une seule combinaison de co-variables. En effet, les co-variables utilisées ici sont considérées comme invariantes sur la période que recouvre la base de données, c'est-à-dire 2003-2014. Il nous est impossible d'intégrer des co-variables représentant les types de cultures ou de gestion au moment de l'investigation, ainsi que les variations climatiques intra-annuelles.

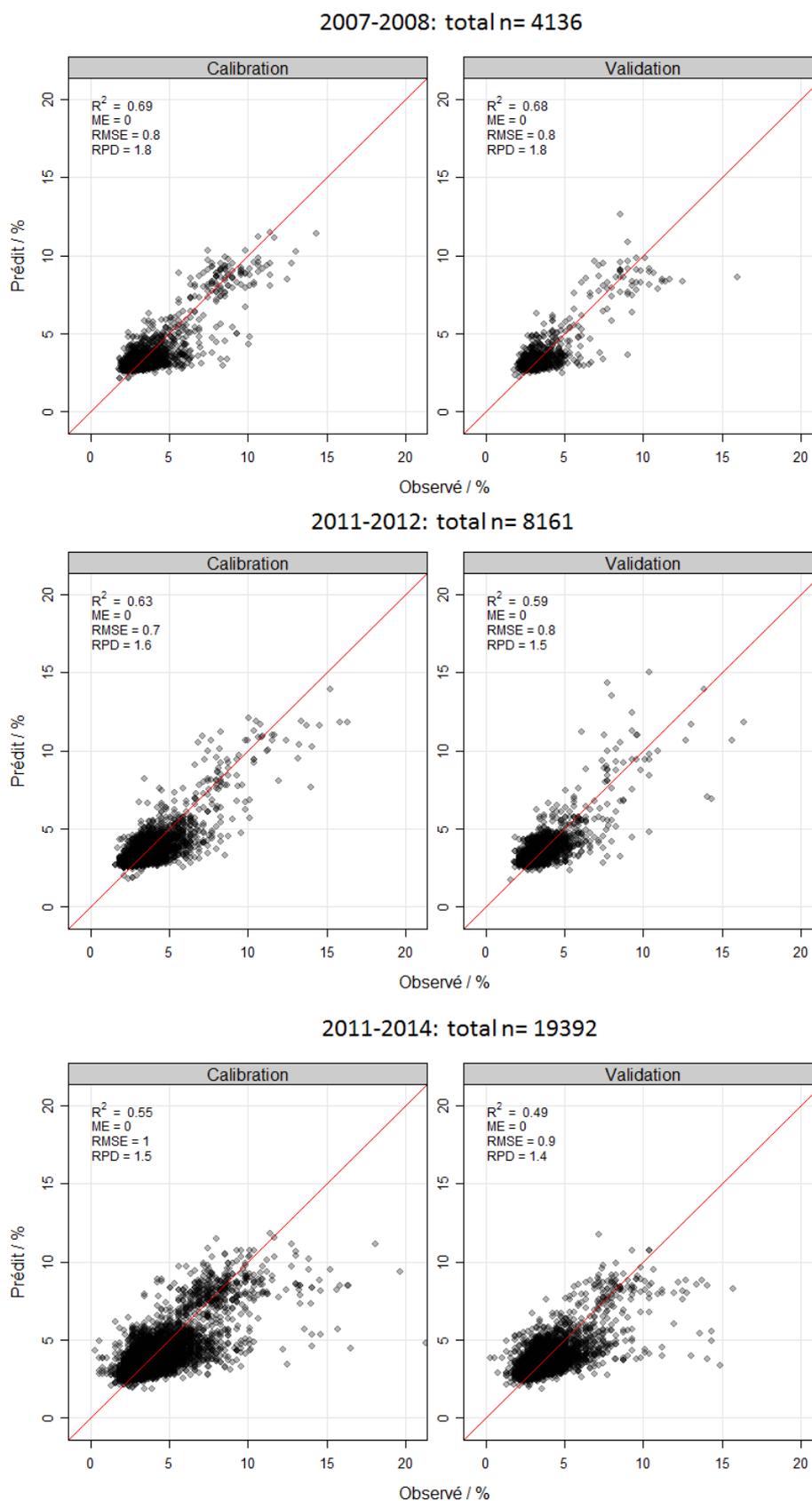


Figure 17 : Evolution de la précision des modèles d'estimation du COT pour les sols sous cultures en fonction du nombre de points d'observation (source : données REQUASUD – licence A09/2016 ; données corrigées d'un coefficient).

Adaptations consécutives de la méthodologie (et scripts)

Consécutivement aux travaux d'analyse présentés ci-dessus, une étape de description de la densité spatiale des points a été intégrée à la fin du premier script. Cette étape est facultative, et son utilisation ne relève que de la curiosité de l'utilisateur. Cette étape permet de visualiser la répartition des points par occupations de sols et de calculer et cartographier des statistiques de densité spatiale (Figure 18).

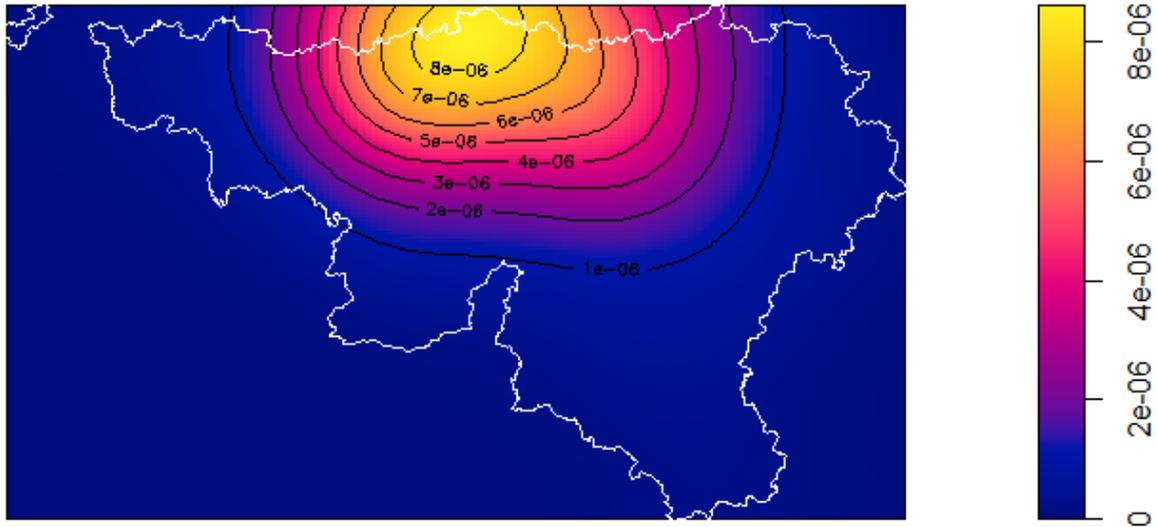


Figure 18 : Exemple de document d'aide à l'analyse de la densité spatiale des points dans le jeu de données.

Une étape supplémentaire dans le traitement des données, cette fois-ci fortement recommandée à l'utilisateur, permet d'analyser la distance entre les points afin d'identifier les groupements de points pouvant se localiser sur un même pixel de résolution 90mx90m. Dès lors, pour chaque groupement identifié, les coordonnées géographiques et les teneurs en COT des points sont moyennées : une observation moyenne est ainsi créée et intégrée à la base de données en remplacement des points du groupement associé. Cette étape permet d'éviter des répétitions par pixel et l'augmentation de la variabilité à courte distance du modèle.

Exemple d'application

Les scripts développés et adaptés pour les données de REQUASUD, tels que décrits ci-dessus, ont été utilisés pour mettre à jour la carte de teneurs en COT de l'EEW2016. Vous trouverez les résultats de cette application dans la section suivante (§ 7).

7. Participation à la mise à jour de l'Etat de l'Environnement Wallon (EEW2016) : le COT

Dans le cadre de la production de l'Etat de l'Environnement Wallon 2016 (EEW2016), il a été confié à l'équipe du projet CARBIOSOL de produire différentes cartes et statistiques (descriptives, box-plots) afin d'alimenter la partie consacrée aux 'Matières organiques dans les sols' (voir mail en Annexe 7). Les produits demandés concernent les teneurs et, si possible, les stocks en COT pour les sols sous cultures, prairies, et forêts, à deux périodes distinctes (1949-1972 et 2004-2014), ainsi que les différences entre ces deux périodes. La méthodologie de cartographie spécifiquement demandée étant celle développée dans le cadre du projet CARBIOSOL. Cette partie propose des informations et références quant aux méthodologies employées, ainsi que les principaux produits en résultant et ayant servis pour l'EEW2016.

Matériels et méthodes

Données

Les bases de données fournies pour effectuer le travail demandé provenaient de trois sources différentes : AardeWerk, base de données récemment mise à jour par le PCNSW (Legrain et al., 2016) pour la période 1949-1972, et REQUASUD (§ 6) ainsi que l'IPRFW (Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie) pour la période 2004-2014.

Modèles GAM et co-variables environnementales

Veillez vous référer à la section 6.1.2. pour les bases de la méthode de modélisation spatiale ou encore au rapport final CARBIOSOL I (Chartin et al., 2015) pour plus de détails. Un modèle doit alors pour chaque variable d'intérêt (teneurs et stocks) être ajusté par occupations de sols (cultures, prairies et forêts) et par périodes considérées (1949-1972 et 2004-2014).

Il est important de noter que l'ensemble des co-variables utilisées dans le cadre du projet CARBIOSOL ont été utilisées indifféremment pour les deux périodes considérées, excepté les couches relatives au climat. Les couches utilisées ici proviennent des précédents travaux de Meersmans et al. (2011) où ont été produites des couches de température et de précipitation moyennes annuelles pour les périodes 1955-1960 et 2001-2006.

Au total pour la période 2004-2014, il existait plus de 38000 données d'observation géoréférencées pour les cultures dans la base de données REQUASUD. Du fait de cette densité d'observations (et de ses inégalités spatiale, temporelle et inter-occupation de sols ; § 6.2.1), les temps de calcul étaient trop importants, et la qualité du modèle en pâtissait. Ce jeu de données a donc été scindé en deux aléatoirement mais en conservant la même répartition du pourcentage de données par année de la base de données d'origine. Une moitié de la base de données a été utilisée pour calibrer et valider le modèle. La seconde moitié a été utilisée pour effectuer une seconde validation du modèle.

Carte des différences estimées en COT

La carte des différences des teneurs en COT entre la période 1949-1972 et 2004-2014 a été obtenue par soustraction de la couche raster des teneurs estimées en COT associée à la période la plus récente à celle associée à la période la plus ancienne. Les valeurs absolues de la couche obtenue ont

été comparées aux valeurs d'erreur standard des modèles de teneurs en COT des deux périodes. Lorsque la valeur absolue de la différence modélisée était inférieure aux erreurs standards des deux modèles, cette différence était considérée comme non-significative. Les pixels présentant des différences non-significatives ont ainsi été masqués pour finaliser la carte des différences estimées significatives des teneurs en COT entre 1949-1972 et 2004-2014.

Scripts informatiques

Les scripts informatiques développés pour les données de REQUASUD ont été également appliqués ici aux données AardeWerk pour la période 1949-1972 et aux données de l'IPRFW. Veuillez vous référer à la partie 6 de ce rapport et notamment la section 6.1.3.

Résultats et discussion

Faisabilité des produits

La production de données et cartes concernant les stocks de COT n'a pu se faire à partir des bases de données procurées étant donné l'absence d'observations de densité apparente et de pierrosité pour les bases de données REQUASUD et IPRFW (Tableau 16). La base de données AardeWerk ne fournit que des classes de valeurs de pierrosité et pas de données de densité apparente. L'utilisation de fonctions de pédo-transfert aurait engendré une importante erreur d'estimation des stocks qui se serait alors ajoutée à l'erreur de modélisation (e.g., Meersmans et al., 2011), et aurait également entravé la détection de changements significatifs entre les deux périodes étudiées.

De plus, la teneur en COT des sols sous forêts pour la période la plus récente est mesurée sur 0-20 cm alors que toutes les autres teneurs sont mesurées par horizons (horizons de surface utilisés ici ; Tableau 17). Pour des raisons d'homogénéité et de comparabilité, les produits cartographiques pour le COT des sols en forêts n'ont pas été intégrés dans l'EEW2016. Vous trouverez tout de même dans la suite de cette section les statistiques descriptives ainsi que les résultats de calibration/validation des modèles pour les sols sous forêts. Les cartes résultantes sont attachées en Annexe 8.

NB : Même si les données sous forêts avaient été comparables entre ces deux périodes, il est peu probable que nous ayons été en mesure de détecter des changements significatifs des teneurs en COT du fait d'une importante variabilité spatiale et d'une relative stabilité du COT dans les sols forestiers sur quelques décades.

Tableau 17 : Descriptifs des données de teneurs en COT utilisées pour la production de statistiques et cartes dans le cadre de l'EEW2016. (n : nombre de données utilisées après soustraction des sites hors des limites wallonnes ou mal géoréférencés, et des sites localisés dans des zones non couvertes par l'ensemble des couches de co-variables utilisées pour la cartographie).

Période	Occupation de sols	Source	n	Echantillonnage			Densité apparente	Pierrosité
				Type	Surface	Profondeur		
1949-1972	Cultures	AardeWerk	2543	Unique	Point	Horizon A	-	Classes
	Prairies		1237					
	Forêts		1902					
2004-2014	Cultures	REQUASUD	38336	Composite	Champ	Horizon A	-	-
	Prairies		5629					
	Forêts	IPRFW	628	Composite	Cercle de 18m de rayon	0-20cm	-	-

Précaution pour l'interprétation des résultats cartographiques: une occupation des sols non évolutive

Il est important de tenir compte du fait que les données d'occupation de sols utilisées pour finaliser les produits cartographiques des périodes 1949-1972 et 2004-2014 sont strictement les mêmes (dérivées de la COSW ; geoapps.wallonie.be). La répartition des trois occupations de sols concernées (cultures, prairies et forêts) n'était pas connue ou numérisée pour la période la plus ancienne. De ce fait, les données d'occupation de sols les plus récentes ont été utilisées pour les deux périodes.

Toutefois, les occupations de sols décrites pour chaque site de la base de données AardeWerk ont été comparées aux occupations de sols actuelles supposées de ces sites (par extraction aux coordonnées des sites AW des occupations de sols données par la couche raster de 90mx90m dérivée de la COSW ; Tableau 18). Certaines précautions sont à prendre pour la lecture du Tableau 18 également : le positionnement des points d'échantillonnage du réseau AardeWerk a un ordre de précision plurimétrique et le passage d'une couche vectorielle (COSW) à une couche raster (maille carrée de 90mx90m) entraîne des imprécisions dans le placement des limites entre les différentes occupations de sols. D'après la comparaison des données d'occupation de sols pour 1949-1972 et pour 2004-2014, plus de 70% des sites sous cultures et des sites sous forêts (70.4% et 74.0 respectivement) n'auraient pas changé d'occupation de sols entre ces deux périodes. 16.8% des sites sous cultures et 14.0% des sites sous forêts seraient désormais sous prairies. Quant aux prairies, seuls 56.3% des sites originellement sous cette occupation de sol le seraient toujours aujourd'hui, tandis que 25.8% d'entre eux seraient aujourd'hui sous cultures. Pour finir, environ 9% du total des sites du réseau AardeWerk seraient aujourd'hui sous une autre occupation de sols (jardin, bâti...) que sous cultures, prairies ou forêts.

Tableau 18 : Comparatif des occupations de sols observées des sites de la base de données AardeWerk pour la période 1949-1972 face aux occupations de sols actuelles dérivées de la COSW (couche raster de 90mx90m utilisée dans cette étude).

Occupation de sols / %		Dérivée de la COSW (90mx90m)				Total
		Cultures	Prairies	Forêts	Autres	
AardeWerk	Cultures (n = 2543)	70.4	16.8	2.8	10.0	100
	Prairies (n = 1237)	25.8	56.3	6.5	11.4	100
	Forêts (n = 1902)	5.8	14.0	74.0	6.2	100

Produits fournis : Statistiques descriptives des données de COT

Vous trouverez ci-dessous les produits fournis concernant les statistiques descriptives pour les teneurs en COT pour chacune des périodes étudiées (1949-1972 et 2004-2014) pour les cultures, prairies et forêts, ainsi que les différences observées entre ces deux périodes pour les cultures et prairies. Les différences observées entre ces deux périodes pour les forêts ne sont pas présentées ; les données pour 1949-1972 (AardeWerk) correspondant à l'horizon de surface, tandis que les données pour 2004-2014 (IPRFW) correspondent aux 20 premiers centimètres de sols.

Période 1949-1972

Les teneurs moyennes en COT pour les sols sous cultures, prairies et forêts sur la période 1949-1972 étaient de 1.62 % C, 3.26 % C et 5.40 % C respectivement, d'après la base de données AardeWerk (Tableaux 19-21). Les teneurs en COT des sols pour les trois occupations de sols tendent à augmenter du nord-ouest au sud-est, de la région sablo-limoneuse à la région ardennaise, et rebaisser en région Jurassique (Figure 19).

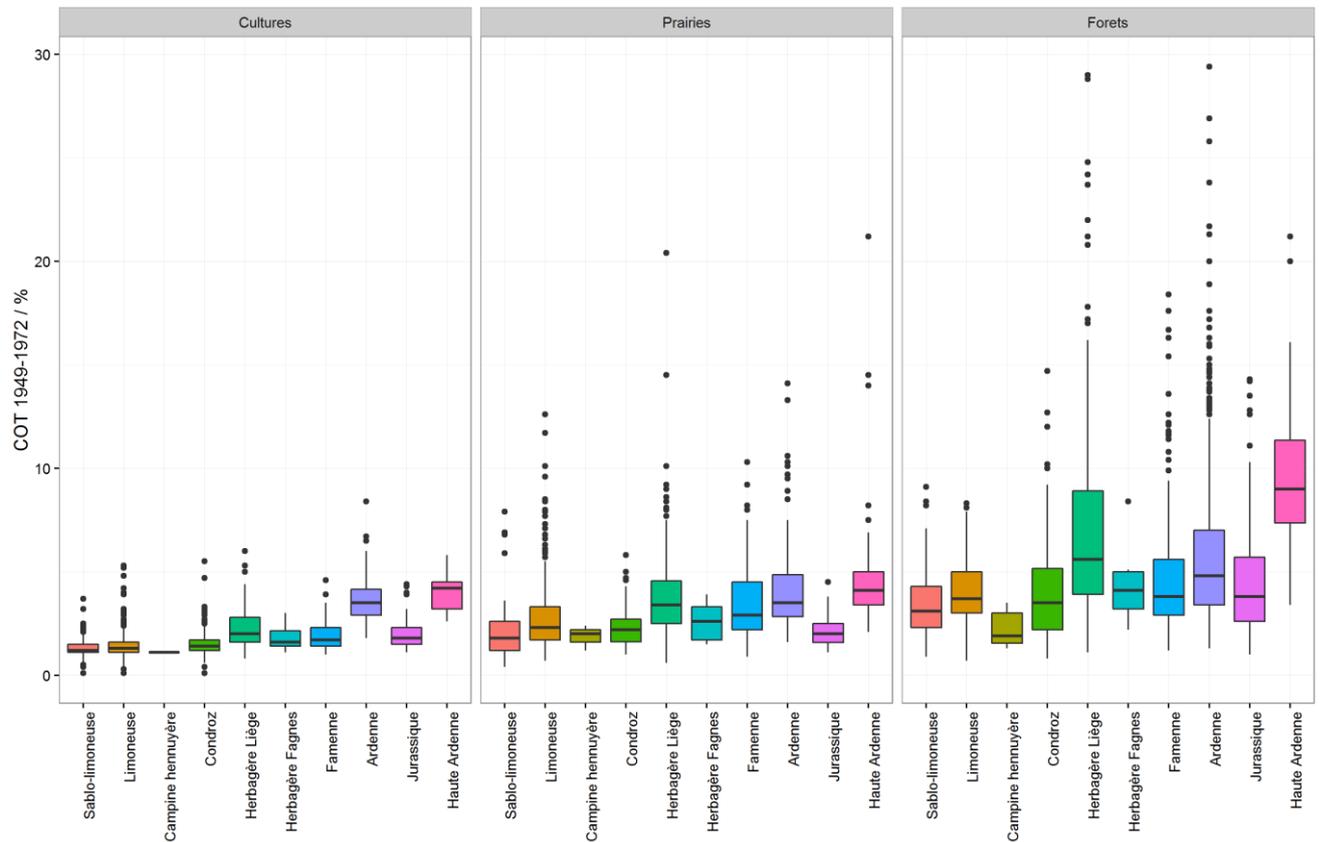


Figure 19 : Box-plots des teneurs en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous cultures, prairies et forêts pour la période 1949-1972 par régions agricoles (source : Aardewerk – mise à jour du PCNSW).

Tableau 19 : Statistiques descriptives des teneurs en COT (% C ; horizon de surface e) des sols sous cultures pour la période 1949-1972 (source : Aardewerk – mise à jour du PCNSW).

Régions agricoles	n	min	Q1	moyenne	médiane	Q3	max
Toutes	2543	0.10	1.20	1.62	1.40	1.70	8.40
Ardenne	139	1.80	2.90	3.62	3.50	4.15	8.40
Campine hennuyère	1	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Condroz	553	0.10	1.20	1.49	1.40	1.70	5.50
Famenne	128	1.00	1.40	1.87	1.70	2.30	4.60
Haute Ardenne	21	2.60	3.20	3.94	4.20	4.50	5.80
Herbagère Fagnes	16	1.10	1.40	1.77	1.60	2.15	3.00
Herbagère Liège	80	0.80	1.60	2.32	2.00	2.80	6.00
Jurassique	78	1.10	1.50	2.00	1.80	2.30	4.40
Limoneuse	1260	0.10	1.10	1.39	1.30	1.60	5.30
Sablo-limoneuse	267	0.10	1.10	1.29	1.20	1.50	3.70

Tableau 20 : Statistiques descriptives des teneurs en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous prairies pour la période 1949-1972 (source : Aardewerk – mise à jour du PCNSW).

Régions agricoles	n	min	Q1	moyenne	médiane	Q3	max
Toutes	1237	0.40	2.00	3.26	2.80	4.00	21.20
Ardenne	142	1.60	2.83	4.17	3.50	4.85	14.10
Campine hennuyère	3	1.20	1.60	1.87	2.00	2.20	2.40
Condroz	130	1.00	1.63	2.30	2.20	2.70	5.80
Famenne	194	0.90	2.20	3.38	2.90	4.50	10.30
Haute Ardenne	57	2.10	3.40	4.91	4.10	5.00	21.20
Herbagère Fagnes	13	1.50	1.70	2.55	2.60	3.30	3.90
Herbagère Liège	295	0.60	2.50	3.80	3.40	4.55	20.40
Jurassique	56	1.10	1.58	2.12	2.00	2.50	4.50
Limoneuse	272	0.70	1.70	2.83	2.30	3.30	12.60
Sablo-limoneuse	75	0.40	1.20	2.15	1.80	2.60	7.90

Tableau 21 : Statistiques descriptives des teneurs en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous forêts pour la période 1949-1972 (source : Aardewerk – mise à jour du PCNSW).

Régions agricoles	n	min	Q1	moyenne	médiane	Q3	max
Toutes	1902	0.70	3.10	5.40	4.40	6.60	29.40
Ardenne	724	1.30	3.40	5.82	4.80	7.00	29.40
Campine hennuyère	6	1.30	1.55	2.23	1.90	3.00	3.50
Condroz	211	0.80	2.20	4.00	3.50	5.15	14.70
Famenne	233	1.20	2.90	4.74	3.80	5.60	18.40
Haute Ardenne	51	3.40	7.35	9.74	9.00	11.35	21.20
Herbagère Fagnes	15	2.20	3.20	4.18	4.10	5.00	8.40
Herbagère Liège	280	1.10	3.90	7.02	5.60	8.90	29.00
Jurassique	182	1.00	2.60	4.54	3.80	5.70	14.30
Limoneuse	111	0.70	3.00	3.95	3.70	5.00	8.30
Sablo-limoneuse	89	0.90	2.30	3.48	3.10	4.30	9.10

Période 2004-2014

Les teneurs moyennes en COT pour les sols (horizon de surface) sous cultures et prairies sur la période 2004-2014 étaient de 1.30 % C et 3.61 % C respectivement, d'après la base de données REQUASUD (Tableaux 22-24). La teneur moyenne en COT pour les sols (0-20 cm) sous forêt pour la même période est de 5.21 % C d'après la base de données de l'IPRFW (Tableau 24). Pour cette période également, les teneurs en COT des sols pour les trois occupations de sols tendent à augmenter du nord-ouest au sud-est, de la région sablo-limoneuse à la région ardennaise, et à rebaisser en région Jurassique (Figure 20).

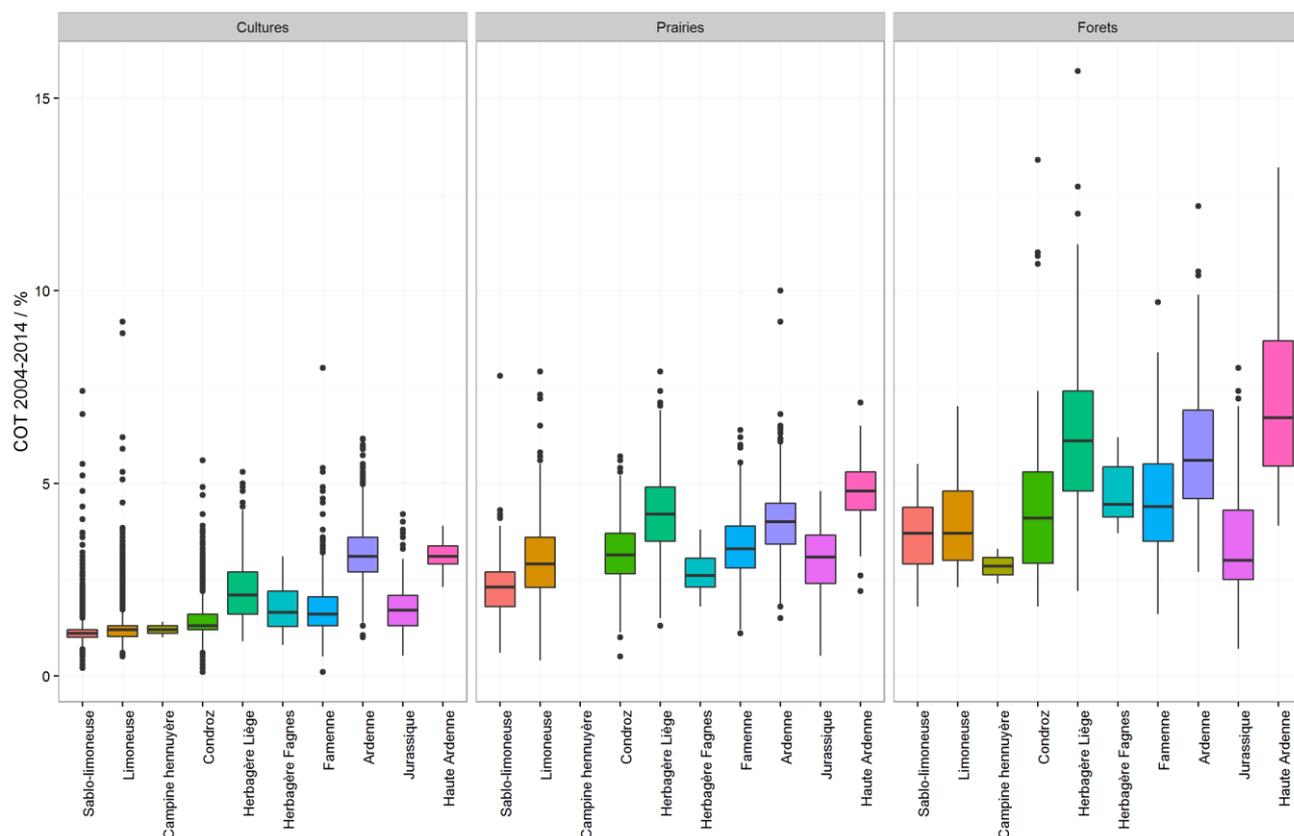


Figure 20 : Box-plots des teneurs en COT (% C ; horizon de surface en cultures et prairies / 0-20cm en forêts) des sols sous cultures, prairies et forêts pour la période 2004-2014 par régions agricoles (source : REQUASUD – licence A09/2016, ArdeWerk).

Tableau 22 : Statistiques descriptives des teneurs en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous cultures pour la période 2004-2014 (source : REQUASUD – licence A09/2016).

Régions agricoles	n	min	Q1	moyenne	médiane	Q3	max
Toutes	38336	0.10	1.04	1.30	1.20	1.40	9.20
Ardenne	524	1.00	2.70	3.20	3.10	3.60	6.16
Campine hennuyère	2	1.00	1.10	1.20	1.20	1.30	1.40
Condroz	7399	0.10	1.20	1.42	1.30	1.60	5.60
Famenne	1011	0.10	1.30	1.75	1.60	2.05	8.00
Haute Ardenne	62	2.30	2.90	3.15	3.10	3.38	3.90
Herbagère Fagnes	78	0.80	1.28	1.73	1.65	2.20	3.10
Herbagère Liège	639	0.90	1.60	2.21	2.10	2.70	5.30
Jurassique	213	0.52	1.30	1.78	1.70	2.09	4.20
Limoneuse	19694	0.50	1.02	1.22	1.20	1.30	9.20
Sablo-limoneuse	8714	0.20	1.00	1.14	1.10	1.20	7.40

Tableau 23 : Statistiques descriptives des teneurs en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous prairies pour la période 2004-2014 (source : REQUASUD – licence A09/2016).

Régions agricoles	n	min	Q1	moyenne	médiane	Q3	max
Toutes	5629	0.40	2.90	3.61	3.60	4.30	10.00
Ardenne	1332	1.50	3.42	4.00	4.00	4.48	10.00
Campine hennuyère	-	-	-	-	-	-	-
Condroz	1068	0.50	2.65	3.16	3.14	3.70	5.70
Famenne	484	1.10	2.80	3.33	3.30	3.88	6.39
Haute Ardenne	202	2.20	4.31	4.82	4.80	5.30	7.10
Herbagère Fagnes	15	1.80	2.30	2.74	2.60	3.05	3.80
Herbagère Liège	1405	1.30	3.50	4.19	4.20	4.90	7.90
Jurassique	119	0.52	2.40	2.98	3.09	3.65	4.80
Limoneuse	665	0.40	2.30	2.98	2.90	3.60	7.90
Sablo-limoneuse	339	0.60	1.80	2.28	2.30	2.70	7.79

Tableau 24 : Statistiques descriptives des teneurs en COT (% C ; 0-20cm) des sols sous forêts pour la période 2004-2014 (source : IPRFW).

Régions agricoles	n	min	Q1	moyenne	médiane	Q3	max
Toutes	628	0.70	3.70	5.21	4.90	6.40	15.70
Ardenne	211	2.70	4.60	5.83	5.60	6.90	12.20
Campine hennuyère	2	2.40	2.63	2.85	2.85	3.08	3.30
Condroz	78	1.80	2.93	4.44	4.10	5.30	13.40
Famenne	101	1.60	3.50	4.60	4.40	5.50	9.70
Haute Ardenne	35	3.90	5.45	7.27	6.70	8.70	13.20
Herbagère Fagnes	14	3.70	4.13	4.70	4.45	5.43	6.20
Herbagère Liège	77	2.20	4.80	6.47	6.10	7.40	15.70
Jurassique	67	0.70	2.50	3.62	3.00	4.30	8.00
Limoneuse	23	2.30	3.00	3.99	3.70	4.80	7.00
Sablo-limoneuse	20	1.80	2.90	3.76	3.70	4.38	5.50

Différences observées entre 1949-1972 et 2004-2014

Les Tableaux 25 et 26 détaillent les différences observées pour les teneurs en COT des sols et leur niveau de significativité par régions agricoles pour les cultures et les prairies entre 1949-1972 et 2004-2014. En moyenne, les teneurs en COT pour les sols sous cultures ont significativement baissées d'environ 20% (i.e., -0.32 % C). Les régions agricoles Ardenne, Haute Ardenne, Jurassique, Limoneuse et Sablo-limoneuse montrent toutes des baisses relatives significatives supérieures à 10% en cultures. Au contraire, les teneurs en COT pour les sols sous prairies ont significativement augmenté de plus de 10% (i.e., + 0.35 % C) entre 1949-1972 et 2004-2014. Les régions agricoles du Condroz et du Jurassique montrent des augmentations relatives significatives de + 37.2% et 40.4%, respectivement en prairies.

Tableau 25 : Différences moyennes observées en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous cultures entre les périodes 1949-1972 et 2004-2014, et niveau de significativité statistique de ces différences (sources : Aardewerk – mise à jour du PCNSW, REQUASUD – licence A09/2016).

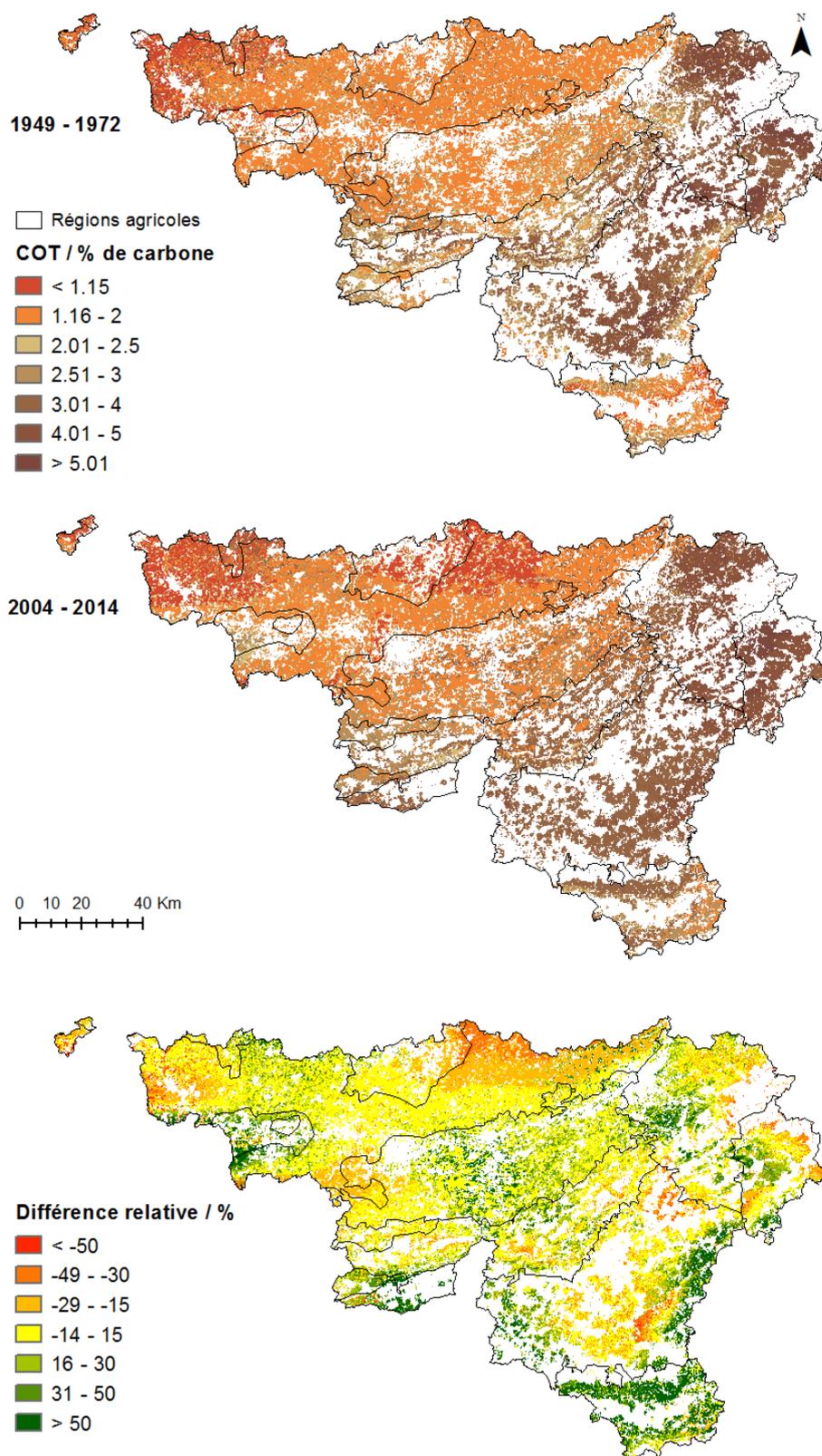
Régions agricoles	moyenne	p	significativité	Pourcentage relatif
Toutes	-0.32	<0.01	+++	-19.6
Ardenne	-0.41	<0.01	+++	-11.4
Campine hennuyère	0.10	1.00	/	9.1
Condroz	-0.07	<0.01	+++	-5.0
Famenne	-0.12	<0.10	+	-6.3
Haute Ardenne	-0.78	<0.01	+++	-19.9
Herbagère Fagnes	-0.03	>0.10	/	-1.9
Herbagère Liège	-0.11	>0.10	/	-4.6
Jurassique	-0.21	<0.05	++	-10.7
Limoneuse	-0.18	<0.01	+++	-12.6
Sablo-limoneuse	-0.15	<0.01	+++	-11.8

Tableau 26 : Différences moyennes observées en COT (% C ; horizon de surface) des sols sous prairies entre les périodes 1949-1972 et 2004-2014, et niveau de significativité statistique de ces différences (sources : Aardewerk – mise à jour du PCNSW, REQUASUD – licence A09/2016).

Régions agricoles	moyenne	p	significativité	Pourcentage relatif
Toutes	0.35	<0.01	+++	10.6
Ardenne	-0.18	<0.05	++	-4.2
Campine hennuyère	-	-	-	-
Condroz	0.85	<0.01	+++	37.2
Famenne	-0.05	<0.05	++	-1.5
Haute Ardenne	-0.09	<0.01	+++	-1.9
Herbagère Fagnes	0.19	>0.10	/	7.4
Herbagère Liège	0.40	<0.01	+++	10.4
Jurassique	0.86	<0.01	+++	40.4
Limoneuse	0.15	<0.01	+++	5.1
Sablo-limoneuse	0.12	<0.05	++	5.6

Produits fournis : cartes des teneurs en COT et différences

La Figure 21 présente les cartes de COT (% C ; horizon de surface) dans les sols sous cultures et prairies pour les périodes 1949-1972 et 2004-2014, ainsi que la carte des différences relatives estimées entre ces deux périodes, produites dans le cadre de l'EEW2016. Dans la suite de cette partie, les résultats de calibration et de validation des différents modèles par période et par occupation de sols seront brièvement présentés, ainsi que les cartes résultantes.



Sources : UCL - ELI - TECLIM ; PCNSW ; REQUASUD (licence A09/2016)

Figure 21 : Cartes des teneurs en COT (% C ; horizon de labour) dans les sols sous cultures et prairies pour la période 1949-1972 (en haut) et la période 2004-2014 (au centre), ainsi que les différences relatives significatives (%) estimées entre ces deux périodes (en bas). Sources : UCL – ELI – TECLIM ; PCNSW ; REQUASUD (licence A09/2016).

Période 1949-1972

A l'issue de la calibration des modèles pour la période 1949-1972, différentes co-variables ont été retenues comme significatives pour expliquer la variance des teneurs en COT pour chaque occupation de sols. La nature des co-variables sélectionnées varie peu d'un modèle à l'autre, c'est-à-dire d'une occupation de sol à l'autre, mais les paramètres des modèles diffèrent. Pour les trois occupations de sols, ont été sélectionnés : les coordonnées géographiques, la pente, les données climatiques pour la période 1955-1960 (i.e., températures et/ou précipitations moyennes annuelles), la teneur en argiles et limons fins, et la profondeur minimale et/ou maximale de drainage des sols (i.e., niveau supérieur et/ou inférieur de la nappe phréatique ; Meersmans et al., 2011). L'altitude fut également sélectionnée pour les modèles relatifs aux cultures et aux prairies, la longueur de flux pour le modèle relatif aux cultures et l'indice TPI (Topographic Position Index ; Jenness, 2006) pour le modèle relatif aux forêts.

En validation, les coefficients de corrélation pour les modèles relatifs aux cultures, prairies et forêts sont de 0.61, 0.34 et 0.23, avec des RMSE de 0.5 % C, 1.4 % C et 3 % C, respectivement (Figure 22). On note un biais pour les prédictions en prairies et forêts, avec une tendance à sur-estimer les faibles teneurs et à sous-estimer les fortes teneurs relatives à chacune de ces occupations de sols.

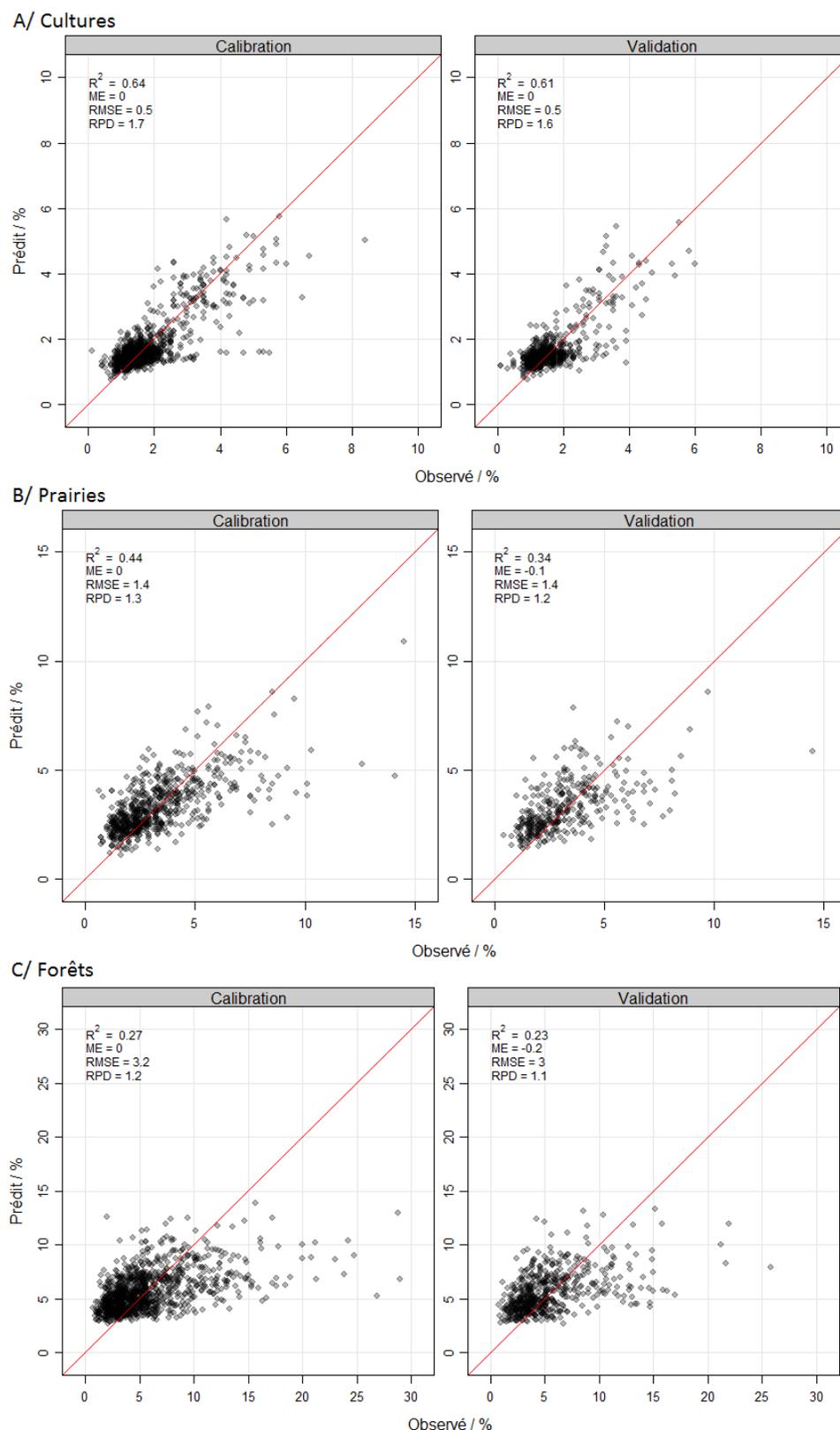


Figure 22 : Diagrammes des valeurs prédites face aux valeurs observées de COT (% C) dans les jeux de calibration et de validation pour les modèles relatifs aux (A) cultures et (B) prairies et (C) forêts pour la période 1949-1972 (horizons de surface ; source : base de données AardeWerk).

La carte de COT des sols sous cultures et prairies pour la période 1949-1972 se situe en haut de la Figure 21. Comme le reflètent les observations (Figure 20), les teneurs en COT augmentent du nord-ouest au sud-est jusqu'en Ardenne, puis rebaissent dans les sols plus sableux de la région Jurassique. Cette tendance reflète les variations de relief et de nature de sols contrôlant actuellement le gradient général d'occupation des sols (de cultures intensives à prairies extensives dominantes), mais également naturellement les variations climatiques. **Il est tout de même important de se rappeler que la couche d'occupation des sols utilisée ici correspond à l'occupation des sols récente (voir plus haut), et que l'on a pu observer qu'environ 30 et 45 % des sites du réseau AardeWerk, respectivement sous cultures et prairies, avaient changé d'occupation de sols depuis 1949-1972 (Tab. 18).**

Période 2004-2014

A l'issue de la calibration des modèles pour la période 2004-2014, les co-variables significatives pour expliquer la variance des teneurs en COT pour chaque occupation de sols étaient :

- pour les cultures : l'altitude, la pente, la longueur de flux, les données climatiques pour la période 2001-2006 (i.e., températures et/ou précipitations moyennes annuelles), la teneur en argiles et limons fins, et la profondeur minimale et/ou maximale de drainage des sols (i.e., niveau supérieur et/ou inférieur de la nappe phréatique ; Meersmans et al., 2011), les apports de C par fumures et lisiers calculés par communes (Dendoncker et al., 2004) et le C-factor (Renard et al., 1991; Maignard et al., 2013) ;
- pour les prairies : les données climatiques pour la période 2001-2006 (i.e., températures et/ou précipitations moyennes annuelles), la teneur en argiles et limons fins, et la profondeur minimale et/ou maximale de drainage des sols (i.e., niveau supérieur et/ou inférieur de la nappe phréatique ; Meersmans et al., 2011) et les apports de C par fumures et lisiers calculés par communes (Dendoncker et al., 2004) ;
- pour les forêts : la pente, l'indice TPI (Topographic Position Index ; Jenness, 2006), les données climatiques pour la période 2001-2006 (i.e., températures et/ou précipitations moyennes annuelles), la teneur en argiles et limons fins, et la profondeur minimale et/ou maximale de drainage des sols (i.e., niveau supérieur et/ou inférieur de la nappe phréatique ; Meersmans et al., 2011).

En validation, les coefficients de corrélation pour les modèles relatifs aux cultures, prairies et forêts pour la période 2004-2014 sont de 0.51, 0.5 et 0.34, avec des RMSE de 0.3 % C, 0.8 % C et 1.7 % C, respectivement (Figure 23). Une double validation du modèle pour les cultures a été effectuée sur la seconde moitié du jeu de données d'origine (non-utilisée pour la calibration et première validation du modèle) et à montrer un R^2 de 0.49 et confirmer une RMSE de 0.3 % C (Figure 24). On note pour chacun des trois modèles un léger biais sur-estimant les faibles teneurs et sous-estimant les teneurs les plus hautes relatives à chaque occupation de sol (Figure 23).

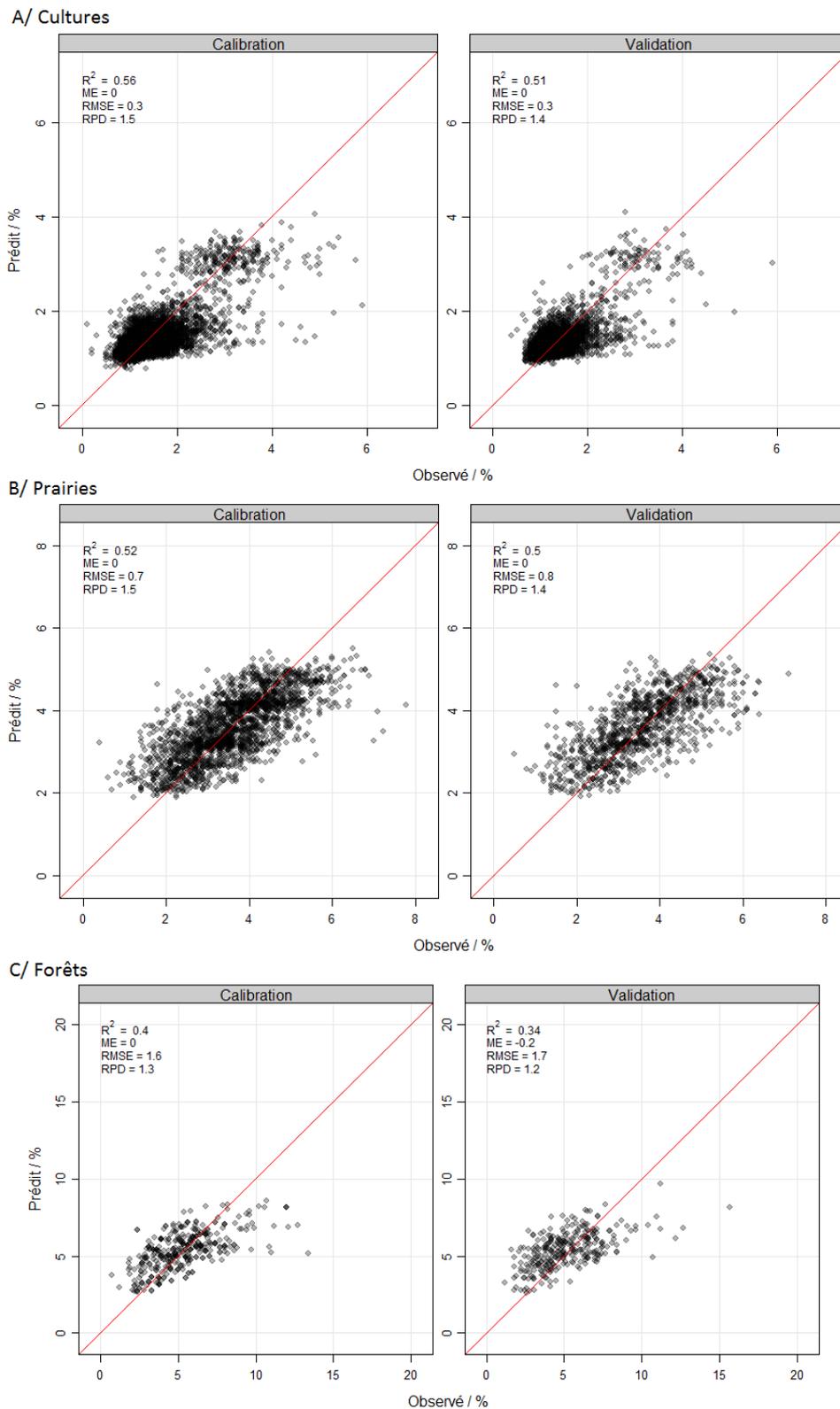


Figure 23 : Diagrammes des valeurs prédites face aux valeurs observées de COT (g C kg^{-1}) dans les jeux de calibration et de validation pour les modèles relatifs aux (A) cultures, (B) prairies et (C) forêts pour la période 2004-2014 (horizons de surface en cultures et prairies, 0-20cm en forêts; sources : base de données REQUASUD – licence A09/2016 - et base de données de l'IPRFW).

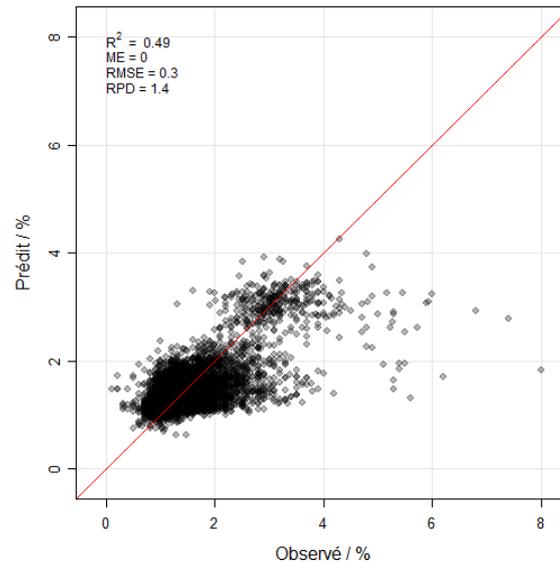


Figure 24 : Diagramme des valeurs prédites face aux valeurs observées de COT (% de carbone ; horizon de surface) dans la seconde moitié du jeu de données d'origine pour les cultures en 2004-2014 (jeu non utilisé pour la calibration du modèle ; source : REQUASUD – licence A09/2016).

La carte de COT des sols sous cultures et prairies pour la période 2004-2014 se situe au centre de la Figure 21. Tout comme pour la période 1949-1972, la tendance générale va à l'augmentation du nord-ouest au sud-est, puis une baisse (ici plus légère) en région Jurassique.

Différences modélisées entre 1949-1972 et 2004-2014

La carte des différences modélisées des teneurs en COT des sols sous cultures et prairies entre les périodes 1949-1972 et 2004-2014 se situe au bas de la Figure 21. Les baisses les plus significatives (< -30%) se localisent dans des zones de grandes cultures à l'ouest de la région Limoneuse et à l'est de la région sablo-limoneuse et limoneuse. On observe également des baisses locales importantes notamment en Famenne, Ardenne et Haute Ardenne, que ce soit sous prairies ou cultures.

Pour finir, les pourcentages de surfaces sous cultures concernées par des sols dégradés, c'est-à-dire ayant moins de 2 % de MO (soit moins de 1.15 % C) pour certains auteurs (Van Camp et al., 2004), ou moins de 1.5 % C pour d'autres (Le Villio et al., 2001), ont été calculées pour les deux périodes :

- Pour la période 1949-1972 :
 - 9% de la surface en cultures avait une teneur en COT < 1.15 % C
 - 60% de la surface en cultures avait une teneur en COT < 1.5 % C
- Pour la période 2004-2014 :
 - 22% de la surface en cultures avait une teneur en COT < 1.15 % C
 - 73% de la surface en cultures avait une teneur en COT < 1.5 % C

Conclusions

Les discussions avec des spécialistes des pays limitrophes montrent que les indicateurs biologiques sélectionnés dans le projet CARBIOSOL forment une bonne base pour l'évaluation de la qualité biologique des sols. Les échanges avec les agriculteurs lors de la journée d'étude organisée avec Greenotec ont en plus montré l'intérêt des agriculteurs pour la recherche et le développement d'indicateurs pour évaluer la qualité biologique du sol en Wallonie.

Le moment d'échantillonnage a un effet significatif sur cinq des huit indicateurs biologiques considérés dans le calcul des gammes des valeurs 'normales'. Seules les mesures du carbone microbien, du quotient microbien et du quotient métabolique ne sont pas significativement influencées par le moment d'échantillonnage pour les parcelles en agriculture conventionnelle. Les gammes établies pour chaque moment d'échantillonnage varient par conséquence, mais montrent une tendance générale semblable. La comparaison de quatre parcelles sous différentes pratiques de gestion aux gammes établies donne un exemple de l'utilisation des plots radar et de la pression écosystémique normalisée pour l'évaluation de la qualité biologique. Des quatre parcelles étudiées, celle en TCS/Claydon et celle en semis direct, ont des valeurs hors des normes définies pour les sites sous froment d'hiver, tandis que celle en agriculture biologique et celle en P&CIPAN sont moins différentes des valeurs de référence.

La fraction stable ne varie pas au cours des différentes campagnes, et présente des variabilités intra- et inter-sites bien moindres que celles du COT et celles de la fraction labile. La fraction labile apparaît responsable de la majeure partie de la variabilité du COT. Bien qu'il n'y ait pas de différence significative d'une saison/campagne à une autre pour la fraction labile, les sites sous gestions de conservation, notamment les sites en non-labour ou labour occasionnel, ont des teneurs en CO_labile supérieures à celles observées pour les sept parcelles de contrôle. Ces résultats tendent à souligner l'influence des pratiques de conservation, et notamment la réduction du travail du sol, sur la 'protection' de la fraction 'active' (le CO_labile) du carbone organique du sol face à la minéralisation, et de ses répercussions sur la fraction stable.

Les corrélations calculées ici confirment les résultats de CARBIOSOL II que le carbone microbien et la respiration potentielle sont les deux indicateurs biologiques montrant les meilleures corrélations avec les indicateurs chimiques, et que les corrélations avec le carbone (COT, fraction labile et carbone extrait à l'eau chaude) sont meilleures que celles avec le pH du sol.

Une analyse de faisabilité de mesure des fractions de CO par spectrométrie infrarouge a été réalisée. Au total, 74 échantillons de sols sous cultures et 62 échantillons de sols sous prairies ont été fractionnés et analysés par SPIR au laboratoire provincial de Tinlot. La librairie spectrale ainsi obtenue a alors été associée aux mesures de COT et CO_stable afin de calibrer et cross-valider des modèles prédictifs pour ces mêmes teneurs en CO. Le modèle calibré pour la fraction stable en cultures apparaît très performant pour l'estimation des teneurs inférieures à 10 g C kg⁻¹ (RPD > 2). Le modèle sous prairies est quant à lui de moindre qualité (RPD < 1.2).

Trois scripts informatiques sous R ont été adaptés aux données plus denses (dans le temps et l'espace) de REQUASUD afin d'y appliquer la méthode de cartographie du COT développée dans CARBIOSOL I. Ainsi, les cartes de COT et erreur de modélisation associée pourront être mises à jour au gré des besoins ou de l'introduction de nouvelles données dans la base. Ces scripts ont été testés avec succès

sur les données de 2004-2014 pour les prairies et cultures dans le cadre de la mise à jour de l'Etat de l'Environnement Wallon 2016. Dans ce même cadre, ces scripts ont également été appliqués aux données sous prairies et cultures de la base de données AardeWerk pour la période 1949-1972 afin d'effectuer une analyse de l'évolution des teneurs en COT en Wallonie sur les dernières décades.

Perspectives

La gestion du sol a le potentiel d'influencer sa qualité. Les effets des pratiques d'agriculture de conservation impliquent de nombreux aspects de la qualité du sol : le risque d'érosion, l'infiltration de l'eau, l'activité et la diversité biologiques, les stocks de carbone organique etc. Les effets, et donc le potentiel d'amélioration de la qualité du sol, dépendent de l'état initial du sol ainsi que de ses caractéristiques (type de sol, climat, etc.). L'inclusion de quatre parcelles sous différentes pratiques de gestion donne une première idée de l'amplitude de l'effet que différentes pratiques ont sur les indicateurs biologiques et du pouvoir discriminatoire des différents indicateurs biologiques. Les parcelles en TCS/Claydon et en semis direct sont en dehors des gammes normales définies pour les cultures en agriculture conventionnelle sous froment d'hiver. L'étude de deux parcelles ne donne évidemment pas de résultat représentatif ; une étude plus approfondie avec plus de sites est nécessaire afin de créer une base de données plus solide sur l'effet de différentes pratiques de gestion sur la qualité biologique du sol. La mesure de l'effet des pratiques de gestion est essentielle pour fournir des valeurs de référence qui pourront servir comme base pour un conseil de gestion. Les parcelles sous agriculture conventionnelle avaient été sélectionnées afin de servir comme témoin à des parcelles « jumelles » sujettes à l'application de techniques de gestion améliorée inventoriées lors de la journée d'étude organisée avec Greenotec. La comparaison aux contrôles et à la gamme de valeurs normales (NOR) permettra d'évaluer l'influence des différents types de gestion sur les indicateurs biologiques et les fractions de CO. L'établissement d'une base de données, compilant les gammes de valeurs observées sous agriculture conventionnelle et celles observées sous différentes pratiques de gestion (agriculture de conservation et/ou biologique) pourrait servir comme référence pour des conseils de gestion.

Valorisation des travaux de recherche (publications et colloques)

Deux articles, qui font suite à l'atelier Sol organisé à Peyresq par l'AgoBioTech de Gembloux en mai 2015, ont été soumis dans la revue BASE en janvier et révisé en juin :

Kruger, I., Chartin, C., van Wesemael, B., Malchair, S., Carnol, M., 2016. Integrating biological indicators in a Soil Monitoring Network (SMN) to improve soil quality diagnosis – a study case in Southern Belgium (Wallonia), Article accepté

Trigalet, S., Chartin, C., Kruger, I., Carnol, M., Van Oost, K., van Wesemael, B., 2016. Potential of soil organic carbon fractionation for improving soil quality diagnosis – a study case in Southern Belgium (Wallonia). Article accepté

Un article a été accepté chez *Geoderma Regional*.

Chartin, C., Stevens, A., Goidts, E., Kruger, I., Carnol, M., van Wesemael, B., 2016. Mapping Soil Organic Carbon stocks and estimating uncertainties at the region scale following a legacy sampling strategy (Southern Belgium, Wallonia). In press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.12.006>

Les résultats des projets CARBIOSOL 1 et 2 ont été présentés à l'EGU à Vienne en avril 2016, aux Journées d'Etudes des sols à Louvain-la-Neuve en juillet 2016 et à la 4^e journée d'étude du PCNSW en décembre 2016:

Chartin, C., Stevens, A., Kruger, I., Goidts, E., Carnol, M., van Wesemael, B.: Estimating Soil Organic Carbon stocks and uncertainties for National Inventory Report - a study case in Southern Belgium. EGU2016, Vienne, Autriche.

Chartin, C., Stevens, A., Kruger, I., Goidts, E., Carnol, M., van Wesemael, B.: Estimation des stocks de Carbone Organique du Sol et des incertitudes pour le Rapport National d'Inventaire (GIEC) – cas de la Wallonie. JES2016, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Chartin, C., Stevens, A., Kruger, I., Goidts, E., Carnol, M., van Wesemael, B.: Apport de la CNSW à l'analyse spatiale du Carbone Organique des Sols. 4^e journée d'étude du PCNSW, Gembloux, Belgique.

Kruger, I., Chartin, C., van Wesemael, B., Carnol, M.: L'intégration d'indicateurs biologiques dans un réseau de surveillance des sols – une étude de cas dans le sud de la Belgique (Wallonie). JES2016, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Trigalet, S., Chartin, C., Kruger, I., Carnol, M., Van Oost, K., van Wesemael, B.: Soil organic carbon fractionation for improving agricultural soil quality diagnosis in different management practices. EGU2016, Vienne, Autriche.

Trigalet, S., Chartin, C., Kruger, I., Carnol, M., Van Oost, K., van Wesemael, B.: Améliorer le diagnostic de la qualité des sols agricoles wallons par un fractionnement du carbone organique du sol. JES2016, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Les indicateurs biologiques utilisés dans le projet CARBIOSOL ont été présentés à un stand lors de l'excursion des JES2016 « Foire de la gestion durable du sol » à la ferme Henricot à Corbain.

Les indicateurs biologiques sont présentés dans le Rapport sur l'état de l'environnement wallon 2016 (REEW 2016) en forme d'une fiche « focus » sur la qualité biologique des sols.

Personalia

Caroline Chartin a été engagée le 1 décembre 2015 (100% ETP) et ce jusqu'au 31 décembre 2016.

Inken Krüger a été engagée le 1 décembre 2015 (100% ETP) et ce jusqu'au 31 décembre 2016.

Références

- Alves de Castro Lopes A. et al., 2013. Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **77**(2), 461.
- Anderson M.J., 2001. Permutation tests for univariate or multivariate analysis of variance and regression. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **58**(3), 626–639.
- Anderson T.-H. & Domsch K.H., 1990. Application of eco-physiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biol. Biochem.*, **22**(2), 251–255.
- Anderson T.H., 2003. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **98**(1–3), 285–293.
- Bloem J. et al., 1994. Dynamics of microorganisms, microbivores and nitrogen mineralisation in winter wheat fields under conventional and integrated management. *Agric. Ecosyst.* 51.1-2, 129-143.
- Bloem J. et al., 2005. Monitoring and evaluating soil quality. *Microbiol. methods Assess. soil Qual.*, 23–49.
- Boddy, E., Hill, P. W., Farrar, J., & Jones, D. L., 2007. Fast turnover of low molecular weight components of the dissolved organic carbon pool of temperate grassland field soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(4), 827-835.
- Buysse P., Roisin C., Aubinet M., 2013. Fifty years of contrasted residue management of an agricultural crop: impacts on the soil carbon budget and on soil heterotrophic respiration. *Agric. Ecosyst. Environ.* 167, 52-59.
- Bossio D. & Scow K., 1995. Impact of carbon and flooding on the metabolic diversity of microbial communities in soils. *Appl. Environ. Microbiol.*, **61**(11), 4043-4050.
- Chan K., 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity – implications for functioning in soils. *Soil Tillage Res.*, **57**(4), 179–191.
- Chartin C., Kruger I., Stevens A., van Wesemael B., Carnol M., 2015. Subvention CARBIOSOL. Carbone organique, biomasse et activité microbienne des sols : vers un indicateur de la qualité des sols en Wallonie. Rapport final. Etude réalisée pour le compte du SPW - DGO3 - DSD.
- Chartin, C., Stevens, A., Goidts, E., Kruger, I., Carnol, M., van Wesemael, B., 2016. Mapping Soil Organic Carbon stocks and estimating uncertainties at the region scale following a legacy sampling strategy (Southern Belgium, Wallonia). In press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.12.006>
- Cluzeau D. et al., 2012. Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *Eur. J. Soil Biol.*, **49**, 63–72.
- Collins J.B., Whiteside E.P. & Cress C.E., 1970. Seasonal Variability of pH and Lime Requirements in Several Southern Michigan Soils When Measured in Different Ways1. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **34**(1), 56.
- Costa D., Freitas H. & Sousa J.P., 2013. Influence of seasons and land-use practices on soil microbial activity and metabolic diversity in the ‘Montado ecosystem’. *Eur. J. Soil Biol.*, **59**, 22–30.
- Creamer R. & Schulte R., 2014. Measuring basal soil respiration across Europe: do incubation temperature and incubation period matter? *Ecol. Indic.*, **36**, 409-418.
- Curry J., 2004. Factors affecting the abundance of earthworms in soils. *Earthworm Ecol.*
- Dendoncker, N., van Wesemael, B., Rounsevell, M., Roelandt, C., 2004. Belgium’s CO₂ mitigation potential under improved cropland management. *Agric. Ecosystems Environ.* 103, 101–116.
- Franzluebbers A.J., Hons F.M. & Zuberer D.A., 1994. Seasonal changes in soil microbial biomass and mineralizable c and n in wheat management systems. *Soil Biol. Biochem.*, **26**(11), 1469–1475.
- Ghani A., Dexter M. & Perrott K., 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biol. Biochem.*, **35**(9), 1231-1243.
- Gil-Sotres F. et al., 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.*, **37**(5), 877–887.
- Gonzalez-Quiñones V. et al., 2011. Soil microbial biomass—Interpretation and consideration for soil

- monitoring. *Soil Res.*, **49**(4), 287.
- Grace, C., Hart, M., Brookes, P. C., 2006. Laboratory Manual of the Soil Microbial Biomass Group. Rothamsted Research.
- Gunn a., 1992. the Use of Mustard To Estimate Earthworm Populations. *Pedobiologia (Jena)*, **36**(2), 65–67.
- Hart S.C. et al., 1994. Dynamics of Gross Nitrogen Transformations in an Old-Growth Forest : The Carbon Connection. *Ecology*, **75**(4), 880–891.
- Haynes, R. J., 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry*, **32**(2), 211-219.
- Hofman J. et al., 2003. Novel approach to monitoring of the soil biological quality. *Environ. Int.*, **28**(8), 771–8.
- Horwarth, W., Paul, E., 1994. Methods of soil analysis. Part 2: Microbiological and biochemical properties. Soil Science Society of America Journal, Books Series.
- ISO 10381-6: Soil quality - Sampling - Part 6. Second edition 2009-03-15.
- Jenness, J., 2006. Topographic Position Index (tpi_jen. avx) extension for ArcView 3. x, v. 1.3 a. Jenness Enterprises.
- Jenkinson D.S., Brookes P.C. & Powlson D.S., 2004. Measuring soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, **36**(1), 5–7.
- Joergensen R., Meyer B. & Mueller T., 1994. Time-course of the soil microbial biomass under wheat: a one year field study. *Soil Biol. Biochem.*
- Joergensen R.G., 1996. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the kEC value. *Soil Biol. Biochem.*, **28**(1), 25–31.
- Kennedy A. & Papendick R., 1995. Microbial characteristics of soil quality. *J. soil water Conserv.* **50**(3), 243-248.
- Kersting K., 1984. Normalized ecosystem strain: a system parameter for the analysis of toxic stress in (micro-) ecosystems. *Ecol. Bull.* 150-153.
- Kruger I., Chartin C., Carnol M., van Wesemael B., 2015. Subvention CARBIOSOL II. Carbone organique, biomasse et activité microbienne des sols : vers un indicateur de la qualité des sols en Wallonie. Rapport final. Etude réalisée pour le compte du SPW - DGO3 - DSD.
- Lawrence A.P. & Bowers M. a, 2002. A test of the ‘hot’ mustard extraction method of sampling earthworms. *Soil Biol. Biochem.*, **34**(4), 549–552.
- Legrain X., Michel B., Roda M., Colinet G., 2016. Aardewerk Wallonie 2016. Subvention PCNSW financée par le Service Public de Wallonie (DGO3). Gembloux, Belgique : Axe Echanges Eau-Sol-Plante, BIOSE, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège
- Le Villio M, Arrouays D, Deslais W, Daroussin J, Le Bissonais Y, Clergeot D, 2001. Estimation des quantités de matière organique exogène nécessaires pour restaurer et entretenir les sols limoneux français à un niveau organique donné. Etude et Gestion des Sols, **8**, 1, 47-63. En ligne. http://afes.fr/afes/egs/EGS_8_1_levillio.pdf
- Luo Y. & Zhou X., 2006. *Soil respiration and the environment*, Elsevier Academic Press.
- Maechler M., Rousseeuw P. & Struyf A., 2014. Package ‘cluster’.
- Maugnard, A., Biélers, C., Bock, L., Colinet, G., Cordonnier, H., Degré, A., Demarcin, P; Dewez, A., Feltz, N ; Legrain, X., Pineux, N., Mokadem, A.I., 2013. Cartographie du risque d'érosion hydrique à l'échelle parcellaire en soutien à la politique agricole wallonne (Belgique). Etude et Gestion des Sols **20** (2), 127-141.
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* **117** (1-2), 3-52.
- Meersmans, J., van Wesemael, B., Goidts, E., van Molle, M., De Baets, S., De Ridder, F., 2011. Spatial analysis of soil organic carbon evolution in Belgian croplands and grasslands, 1960-2006. *Glob. Chang. Biol.* **17**, 466-479.
- Miller R.O. & Kissel D.E., 2010. Comparison of Soil pH Methods on Soils of North America. *Soil Sci. Soc.*

- Am. J.*, **74**(1), 310.
- Nakazawa, M., & Nakazawa, M. M., 2014. Package 'fmsb'. The Comprehensive R Archive Network [online].
- Nunan N. et al., 2000. Temporal changes in nitrogen mineralisation, microbial biomass, respiration and protease activity in a clay loam soil under ambient temperature. *Biol. Environ.*, 107-114.
- Paz-Ferreiro J. & Fu S., 2016. Biological Indices for Soil Quality Evaluation: Perspectives and Limitations. *L. Degrad. Dev.*, **27**(1), 14–25.
- Pell M., Stenström J. & Granhall U., 2006. Soil respiration. In: *Microbiological methods for assessing soil quality*. 117–126.
- Pereira e Silva M.C. et al., 2013. Microbe-mediated processes as indicators to establish the normal operating range of soil functioning. *Soil Biol. Biochem.*, **57**, 995–1002.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., Porter, J.P., 1991. RUSLE: Revised Universal Soil Loss equation. *J. Soil Water Conserv.* 46, 30-33.
- Ritz K. & Robinson D., 1988. Temporal variations in soil microbial biomass C and N under a spring barley crop. *Soil Biol. Biochem.*, **20**(5), 625-630.
- Rutgers M. et al., 2009. Biological measurements in a nationwide soil monitoring network. *Eur. J. Soil Sci.*, **60**(5), 820–832.
- Rutgers M., Breure A. & Insam H., 2005. Substrate utilization in BiologTM plates for analysis of CLPP. *Micr. meth. assess. soil quality*, 212.
- Schloter M., Dilly O. & Munch J., 2003. Indicators for evaluating soil quality. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **98**(1–3), 255–262.
- Sherrod, L. A., Dunn, G., Peterson, G. A., & Kolberg, R. L., 2002. Inorganic carbon analysis by modified pressure-calimeter method. *Soil Science Society of America Journal*, 66(1), 299-305.
- Shi Y. et al., 2013. Seasonal variation of microbial biomass, activity, and community structure in soil under different tillage and phosphorus management practices. *Biol. Fertil. Soils*, **49**(7), 803–818.
- Smit E. et al., 2001. Diversity and seasonal fluctuations of the dominant members of the bacterial soil community in a wheat field as determined by cultivation and molecular methods. *Appl. Environ. Microbiol.*, **67**(5), 2284–91.
- Sparling, G., Vojvodić-Vuković, M., & Schipper, L. A., 1998. Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(10), 1469-1472.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods*, (methodsofsoilan3), 475-490.
- Trevor, H. and Tibshirani, R., 1986. Generalized additive models. *Statistical science* 1(3), 297-310.
- Trigalet, S., van Oost, K., Roisin, C. van Wesemael, B., 2014. Carbon associated with clay and fine silt as indicator for SOC decadal evolution under different residue management practices. *Agric. Ecosyst. Environ.* 196, 1-9.
- Uchida Y., Nishimura S. & Akiyama H., 2012. The relationship of water-soluble carbon and hot-water-soluble carbon with soil respiration in agricultural fields. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **156**, 116–122.
- Van-Camp L, Bujarrabal B, Gentile AR, Jones RJA, Montanarella L, Olazabal C, Selvaradjou S-K, 2004. Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/3, 872 p. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. En ligne. <http://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/vol3.pdf>
- Vance E.D., Brookes P.C. & Jenkinson D.S., 1987. an Extraction Method for Measuring Soil Microbial Biomass C. *Soil Biol. Biochem.*, **19**, 703–707.
- Waldrop M.P. & Firestone M.K., 2006. Seasonal Dynamics of Microbial Community Composition and Function in Oak Canopy and Open Grassland Soils. *Microb. Ecol.*, **52**(3), 470–479.
- Wardle D.A., 1998. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: A global-scale synthesis. *Soil Biol. Biochem.*, **30**(13), 1627–1637.
- Wheeler B. & Orphaned M., 2014. Package 'ImPerm'. *R Packag. Version*.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Résumé de la discussion du Workshop sur les indicateurs biologiques de la qualité du sol du 15 septembre.

2nd Workshop on Soil Biological Indicators

Discussion summary

Contributions by Inken Krüger, Monique Carnol, Jane Debode, Bruno De Vos, ...

The objective of the 2nd Workshop on Soil Biological Indicators was to discuss method selection, standardisation, evaluation and implementation in field surveys and monitoring. In the morning session, specialists from four European countries presented their experiences with measurements of biological indicators in their national/regional networks. During the afternoon we focused on discussions on the challenges and perspectives of using biological indicators of soil quality in existing and/or new Belgian Soil Monitoring Network(s).

Jaap Bloem – Soil Monitoring in the Netherlands
Anneke Beylich – Soil Monitoring in (Northern) Germany
Guénola Pérès – Soil Monitoring in France
Anna Hug – Soil Monitoring in Switzerland

Discussions

The discussion was split into two parts: for the first half of the discussion session, the attendees split into groups of six or seven people to discuss the perspective of soil monitoring in Belgium. The 'W' questions, **Why** (goals, aims, and targets of a Belgian soil monitoring network), **What** (the selection of indicators), **Where** (choice of sites: Decision between using pre-existing and including new sites), **When** (best time for sampling, sampling intervals), **Who** (actors, stakeholders, finances), and **how** (standardization of methods, sampling scheme, data repository etc.), were proposed as starting points for the discussions. In the second half of the discussion session, a spokesperson made a synthesis of the most important discussion points for the whole audience.

WHY:

Why we need soil biological monitoring is basically linked to the functional role of soil organisms to provide and sustain soil functions and services. We need data on soil biological communities and food web assessments in order to detect unhealthy soils and for monitoring soil condition, soil quality improvements, evaluation of restoration projects and of climate change effects.

Therefore it is important to set ‘normal operating ranges’ or boundaries/thresholds for functional groups to detect if the soil ecosystem/food web is out of balance.

Generally, most scientists are already convinced for decennia that soil biological monitoring is needed. However, the majority of society/policy makers do not care so much for soil biological quality or soil biodiversity. They should be convinced to financially support surveys and long term monitoring.

In order to convince policy makers we should highlight the risks of loss of soil biodiversity for the sustainable provision of agricultural and silvicultural products, loss of fertile ground (costs of erosion, dredging, fertilisation), production of drinking water, climate mitigation, etc... mainly indicating the economical consequences. Thus, raising awareness and clear communication of how things ‘work’ are very important duties for scientists.

We should clarify what are “the normal ranges of soil biological fertility”, what indicators are most suitable for indicating healthy soils, where the “hot spots” are where soil is threatened and how we can improve the biological quality and resilience of soils.

We should also convince policy makers/society that monitoring is needed to see (long term) trends and evolutions in soil biological quality and to set thresholds, in order to evaluate the anthropogenic impact of land-use, management practices, pollution, climatic changes, ...

Therefore scientists should enforce the policy level. Possible entry points are ⁽¹⁾ Participatory approach, ⁽²⁾ Demand driven by farmers, gardeners, ⁽³⁾ Citizen science, ...

Another enforcement is through environmental law. For instance in Switzerland it was successfully put in environmental protection acts that soil fertility equals a healthy biological community. So monitoring of biological community is needed to prove soil health and fertility.

The question “why?” is also strongly linked to the “who (pays)” question. “Why” often means a reason that can convince funding agencies that soil monitoring networks are a necessity and a help with the definition of regulations. These reasons are changing over the years as environmental problems and public awareness for these problems evolves. In the 1980s, soil monitoring network aimed at measuring the effects of pollution on soils (like the Swiss NABO created in 1984). Interest then shifted towards effects of global change. At the moment, soil ecosystem functions and sustainability of systems are the focus of many research efforts. Ecosystem functions are closely linked to the food pyramid and the carbon cycle (organic matter turnover). Organic matter and carbon are important entry points to show the importance of soil food webs and soil biodiversity linked with soil physicochemical fertility.. Not only the amount of carbon (stocks, pools) but also the ‘stability’ of carbon (carbon speciation) which is linked with vegetation and biological processes in soil.

New molecular techniques are very promising to study soil biodiversity, and impact on soil condition (risks maps, point of no return) and offer new possibilities to determine soil biological quality more rapidly than in the past, when laborious sampling and identification generally jeopardized large scale biological assessments and monitoring.

Finally, various studies should indicate the added value of soil biological monitoring compared to traditional physicochemical soil monitoring. Ideally, if a soil is considered healthy (based on robust soil bioindicators), various constraints/levels on nutrient or pollutant leaching,

fertilisation levels, C-content, etc should not be met anymore (or to a lesser extent) which would make life easier and less costly for land-users. When a soil is considered unhealthy, there are clearly more risks for soil degradation and thus more costs to indicate the possible threats (by physicochemical parameters) and solutions for soil remediation. Land-users will try to avoid the costs and will consequently take care more of their soils, focussing on the biological component.

WHAT:

Selection of indicators (“what?”) depends on the aims of the network. In general, it can be said that the more indicators, the better. Money and necessity of know-how were identified as limiting factors in the selection of indicators. It’s generally best to start working with indicators that you already routinely use and already know. In Belgium, information is scattered; an inventory with information on available indicators (e.g. availability of experienced researchers, material, protocols etc.) could be useful before performing indicator selection. Many indicators require specialized knowledge. This is especially true for the use of soil fauna as species’ identification requires taxonomic expertise that is rare.

The uncertainty of funding of many soil monitoring networks – annual, rather than long-term projects, possibly with interruptions – can often mean that experts leave monitoring networks and that their knowledge disappears with them. As genetic/molecular methods for species identification become cheaper and more readily available, species identification might become easier to implement in monitoring networks. Other simplification, like classification in functional groups, do not really present a more practical indicator as species have to be identified first anyway (moreover, not every species can be attributed to a functional group).

Three characteristics for biological indicators have been identified: they should be discriminating, stable (e.g. also measurable under extreme conditions; as a yes/no answer is not necessarily useful), and easy to measure. Bacteria and fungi present the advantage over soil fauna that they are always present, even earthworms, the most important soil macro-organism, has a high variability and its abundance highly depends on short-term fluctuations in soil conditions such as the weather (mind that the weather of the past four-six weeks is relevant, and that precipitations during that period affect earthworms more than measurements of soil water content at time of sampling).

There are two main pathways to measure microbial species composition: PLFA and DNA analysis. PLFAs have been found to be more replicable in the Dutch soil monitoring network. The half-life of enzymes in the soil (weeks) is much shorter than of genes (months) making the former a more precise measurement for current state of soil.

Guénola Pérès presented how to involve citizens in the collection of data on earthworms. The OPVT protocol resulted in a huge increase of available data. The high quantity of data is seen as balancing out the lower quality. It was also noted that the quality of data was inferior when the farmers were paid than when they volunteered without financial compensation. Having citizens helping scientists with sampling of some indicators is seen as hard to implement in Belgium: many farmers see ‘nature as the enemy’, and would consider it dangerous to measure/report as any available data might eventually be used against them. Finding interested participants and organizing them is seen as taking too much energy than

can be justified by the results. Only short-time programs seem feasible, rather than the longer term envisioned in monitoring networks. It could however serve as a tool to raise awareness for soil biology and make people more enthusiastic about soil life.

Successful soil monitoring on agricultural sites requires good communication with farmers and farmers' organisations. The (direct) benefits to farmers have to be considered from the planning stages of a soil monitoring network. In general, owners of organic farms (or using conservation agriculture) are more interested and easier to cooperate with. Farmers expect fast results, while science is a slow process and, especially in soil monitoring networks, it can take several years or decades for scientists to be comfortable to draw conclusions (three to five sampling points are generally seen as necessary to distinguish trends – while sampling intervals are (sometimes) over ten years). Results cannot always be translated into statements that are meaningful to farmers/foresters. In this regard, it is advised to include robust indicators that can easily be interpreted for and by farmers such as cold and hot water extractable carbon and nitrogen.

Measurements should also include physical parameters: water infiltration is very important for soil quality and field hydrology. Number of earthworms per square meter may be a good proxy for infiltration capacity and to show that soil compaction is limited.

WHERE:

Just like the “what?” the “where?” is strongly limited by available funding. In this regard it is important to capitalize on existing data and networks (such as LTER or ICOS). Grid approaches (like in France, 16*16km) might miss specific habitats or soil types. The 2100 sites in France, while representative of different land uses, include no representative number of contaminated sites. Consideration of contaminated sites can and shift the way the data of all sites are analysed.

A minimum number of four sites is necessary for calculation of representative median values. Three main parameters that influence soil biological quality should be identified (at least): management, pH and clay content.

Sampling depth is more complicated in forest than in agricultural sites. In forest soils, separation of forest floor and mineral soils is necessary. International comparison of data from forest soils is hindered by different classification methods of the organic layers or soil types. Using correlation systems like World Reference Base (soil groups) or EU humus forms are proposed.

Whether the same indicators should be applied in forest and agricultural sites does, again, depend on available funding. As soil monitoring networks are set up to not only answer current questions, but to answer questions we might have in a couple of decades, it is best to avoid gaps in the data set and measure everything everywhere. Some indicators, such as collembolus, work better under one land-use forms (in this case forests) than others (agricultural soils). For anecic earthworms it is the other way around.

WHEN:

Sampling period

Usually soil biological assessments are performed during spring and/or fall and not in winter or high summer. Depending on the species groups it may be spring or fall.

For agricultural soils, the field sampling period should be agreed with the farmers, especially in spring when the land needs to be fertilised and cultivated. In Switzerland farmers get a financial compensation to wait for the sampling event.

For forest soils, sampling in spring or fall may be quite different due to litterfall, which is obviously more important in deciduous forests.

Periods of snowfall and frost are generally avoided, as well as long periods of drought.

Sampling intervals

Often 5 year monitoring intervals are suggested. However, if abrupt changes in management or landuse (e.g. deforestation) occur, it may be interesting to assess just before and after the change.

It might be useful to analyse seasonal (e.g. monthly) variation for a selected set of plots in order to determine the optimal sampling period for specific species (groups).

WHO:

Data from monitoring networks is generally of interest to the ministries of agriculture and of the environment. Their interest fluctuates depending on pressure from the EU. Further farmer's organisations can have an interest, though they are generally more interested in the more practical side of things (e.g. implications for yields, possibilities to reduce fertilizers and/or pesticides, effects of reduced tillage). In the Netherlands, funding for practical research projects must partially come from private sources.

Samples are analysed by central labs that use specific protocols. Changing laboratories, even when the same protocols are used, can mean that some data has to be disregarded as it is not comparable (as is the case with some of the older microbial analysis results in the German soil monitoring network). In the best case scenario, one team collects all samples. Although often considered as 'luxury', intensive (field) training is very important. Films rather than written protocols can be helpful to record the correct way of sampling. Natural history museums can also offer expertise and provide a biodiversity platform.

Lawyers are advised to be included in the formulations of conclusions drawn from soil monitoring networks as scientists can be unaware of the legal implications of specific wordings.

HOW:

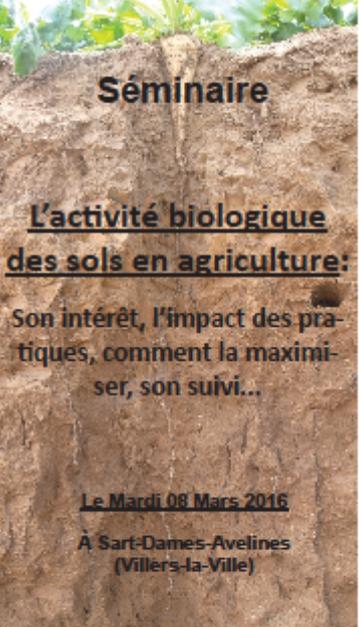
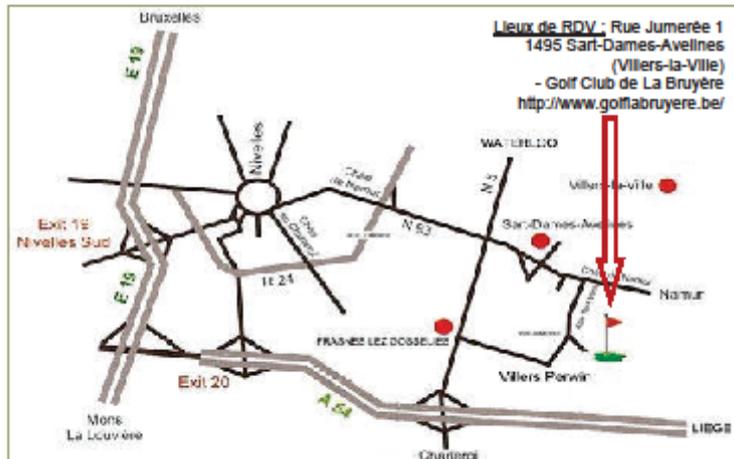
While scientists who work on monitoring networks often prefer to stick to 'safe' statements such as saying a sampled site is within the ranges of values or outside ranges of values, farmers don't want their soils to be 'average' or, even worse, 'outside of norms'. More judgemental (e.g. good or bad) assessment is necessary in communication with farmers. Soil monitoring networks often do not pre-assess their sampling sites based on criteria such as poor or rich soils, but include random sites that will then be considered relatively to one another. Expert judgement, based on measurements, but also taking into account factors such as the ecological footprint of farms, is needed to define baselines.

One current main question in data management is providing open access to the database. Databases for biological indicators exist such as the German (open for data from neighbouring countries) Edaphobase system, linking information directly to GBIF (Global Biodiversity Information Facility). However this system contains mainly zoological observations, no

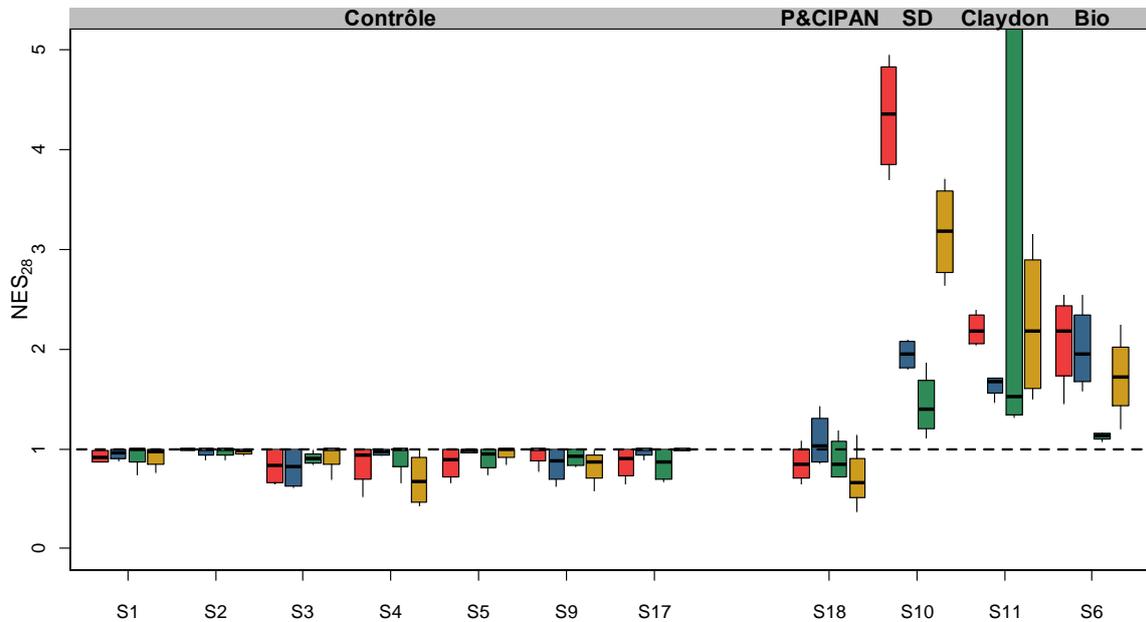
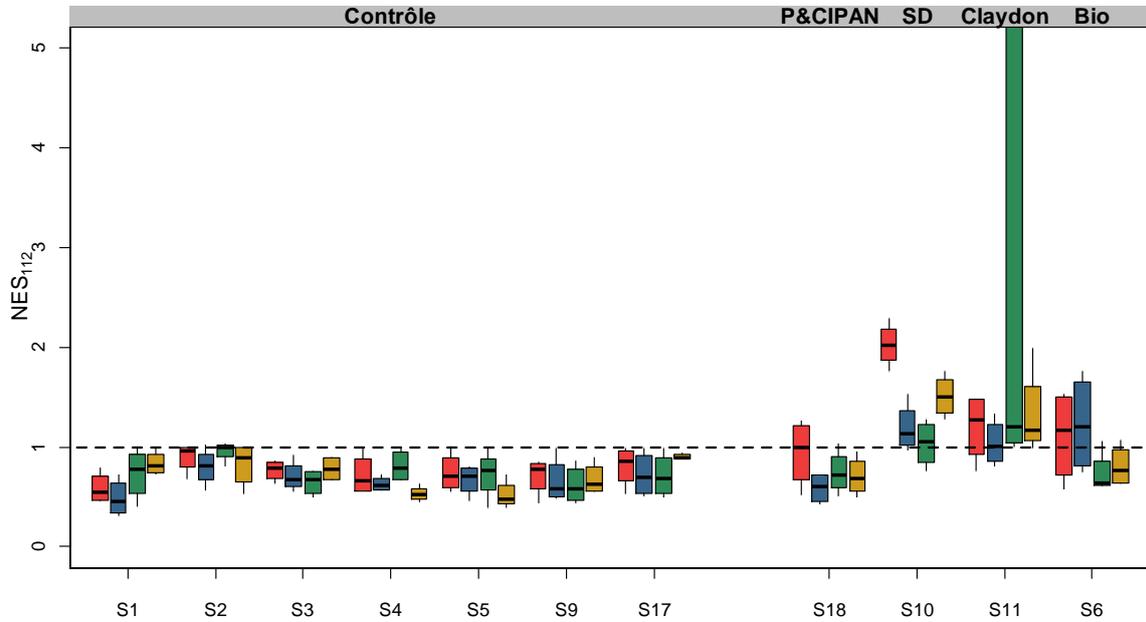
genetical data nor functional bioindicators. Alternatively (or additionally), the French colleagues will investigate if the French database “EcoBioSol” might be used for Belgian data as well.

Many scientists are not willing to share raw data, but might be open to sharing meta-data as well as mean or median values. Agreements are necessary so the data can be used more widely. Data papers of soil biological datasets may also be published, giving credits to those spending big efforts in sampling, identification and compiling the data and at the same time allowing datasets becoming available to other researchers.

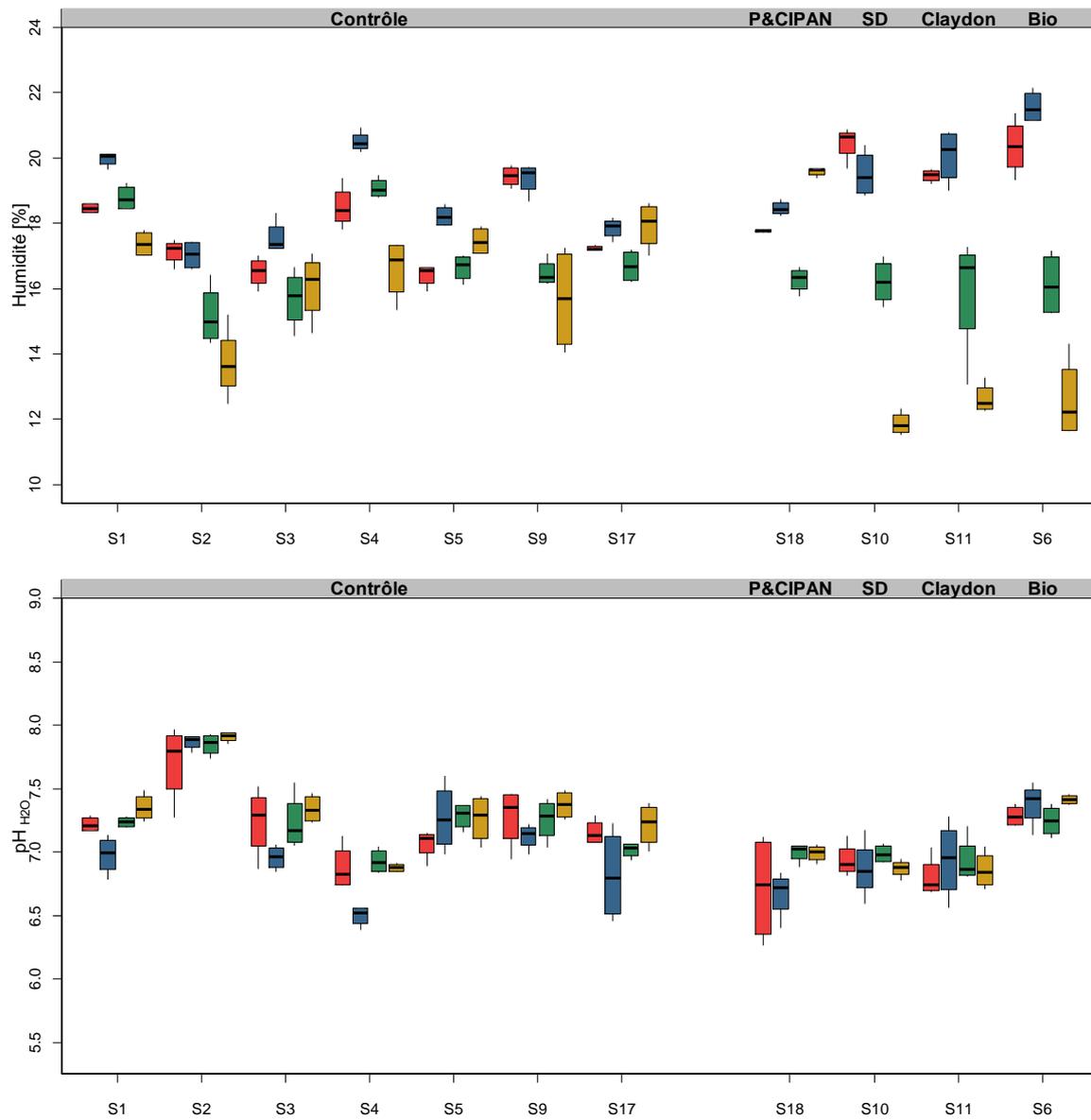
ANNEXE 2 : Invitation et programme de la journée thématique 'L'activité biologique des sols en agriculture' du 8 Mars 2016

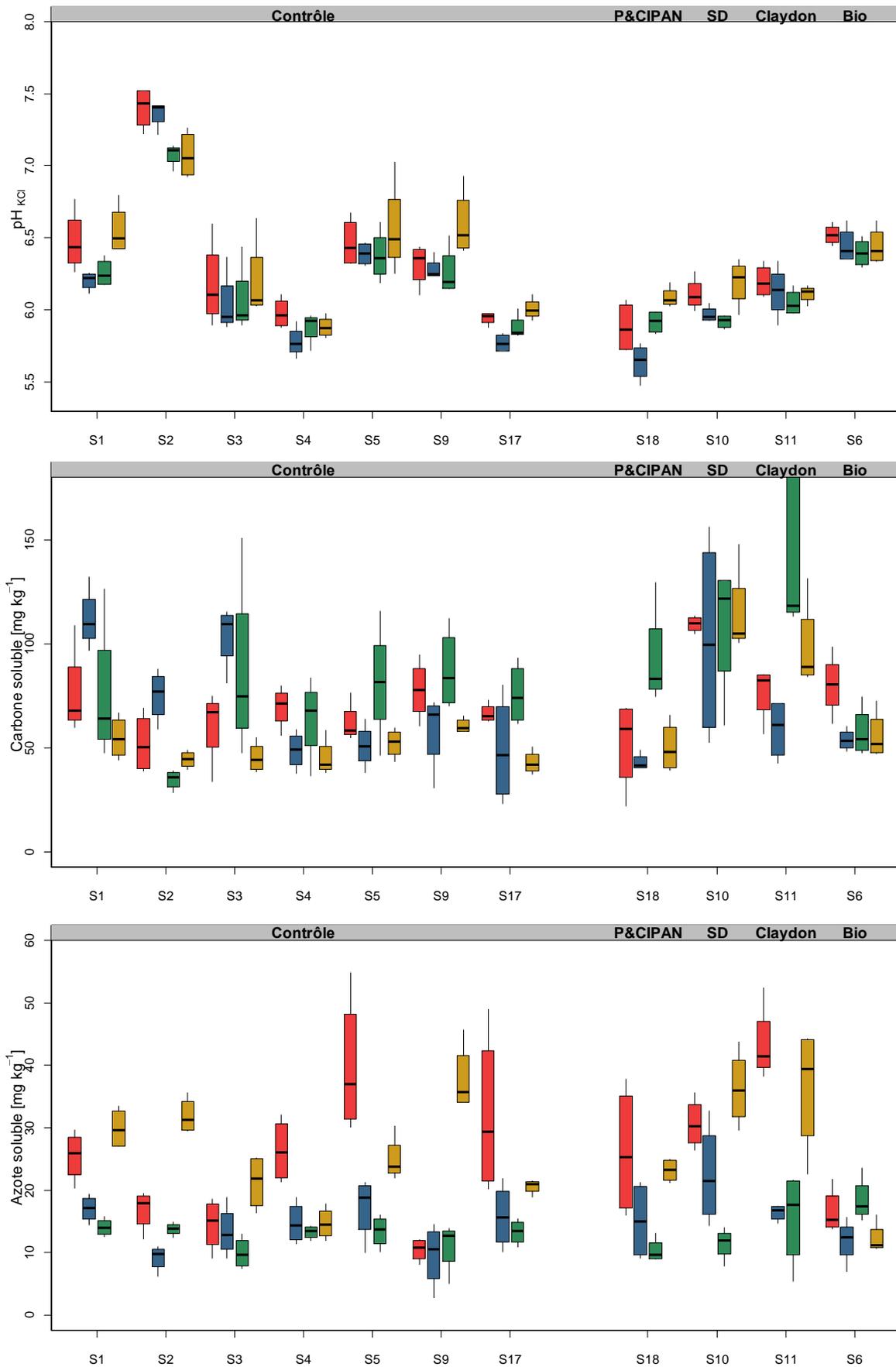
<h2 style="text-align: center;">Informations</h2> <p>Faites nous savoir votre venue par mail ou par téléphone en indiquant votre Nom et Prénom, avant le 03/03</p> <p>Une participation de 10€ sera demandée à l'accueil (Uniquement aux non membres de l'ASBL Greenotec)</p> <p>Un fléchage « Greenotec » sera disposé aux intersections à proximité du lieu de RDV</p>	<h2 style="text-align: center;">Contacts</h2> <p>Maxime Merchier (Coordinateur de l'ASBL Greenotec): </p> <p>GSM 0032(0)474.31.18.47 Bureau 0032 (0)85.589.470 E-mail merchier.m@greenotec.be</p> <p>Caroline Chartin (UCL) GSM 0032(0)488.81.44.35 Bureau 0032(0)10.47.28.77 E-mail caroline.chartin@uclouvain.be</p>	<p style="text-align: center;">Organisé par:</p> <p style="text-align: center;">L'ASBL Greenotec et le SPW (DG03)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">    </div>  <h2 style="text-align: center;">Séminaire</h2> <h3 style="text-align: center;">L'activité biologique des sols en agriculture:</h3> <p style="text-align: center;">Son intérêt, l'impact des pratiques, comment la maximiser, son suivi...</p> <p style="text-align: center;">Le Mardi 08 Mars 2016 A Sart-Dames-Avelines (Villers-la-Ville)</p>
 <p style="text-align: center;">Lieux de RDV : Rue Jumerée 1 1495 Sart-Dames-Avelines (Villers-la-Ville) - Golf Club de La Bruyère http://www.golffabruyere.be/</p>		
<p>Chaque année pour son assemblée générale (AG) l'ASBL Greenotec organise un séminaire en lien avec la conservation/connaissance des sols :</p> <ul style="list-style-type: none"> - AG 2014 : compaction des sols - AG 2015 : les matières organiques en agriculture. <p>Dans la continuité de ces thématiques, pour son AG 2016, Greenotec, en collaboration avec le SPW, organise un séminaire sur l'activité biologique des sols en agriculture.</p> <p>Durant cette après-midi thématique, nous aurons le plaisir d'accueillir Lionel Ranjard, directeur de recherche à l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique en France), docteur en écologie microbienne spécialisé en microbiologie du sol et de l'environnement.</p> <p>Durant cette après midi, nous traiterons de l'activité biologique (AB) des sols:</p> <ul style="list-style-type: none"> - rôle de l'AB en agriculture, - les facteurs qui influencent son développement, - comment la mesurer... <p>Ainsi, ce séminaire a pour but de vous éclairer de manière concrète sur la qualité biologique des sols et sur son intérêt pour la production agricole.</p>	<h2 style="text-align: center;">Programme</h2> <p>14h: Accueil</p> <p>14h15: Lionel Ranjard, INRA de Dijon Intérêt de la biologie des sols pour les productions agricoles : de la recherche aux agriculteurs <i>Questions/Réponses</i></p> <p>15h30: Jean-Baptiste Donnaint, directeur régional TMCE Nord-Picardie Impact de la fertilisation sur la biodiversité microbienne des sols : résultats d'études scientifiques et intérêts pour les agriculteurs. <i>Questions/Réponses</i></p> <p>16h30: Témoignages d'agriculteurs de Greenotec <i>Questions/Réponses</i></p> <p>17h: Caroline Chartin, UCL & Inken Krüger, ULg Présentation du projet CARBIOSOL: « Développement d'indicateurs de la qualité biologique et du carbone organique des sols agricoles en Wallonie » <i>Questions/Réponses</i></p> <p>Fin prévue à 17h30</p> <p>Verre de l'amitié + tarte</p> <div style="text-align: right;">  </div>	

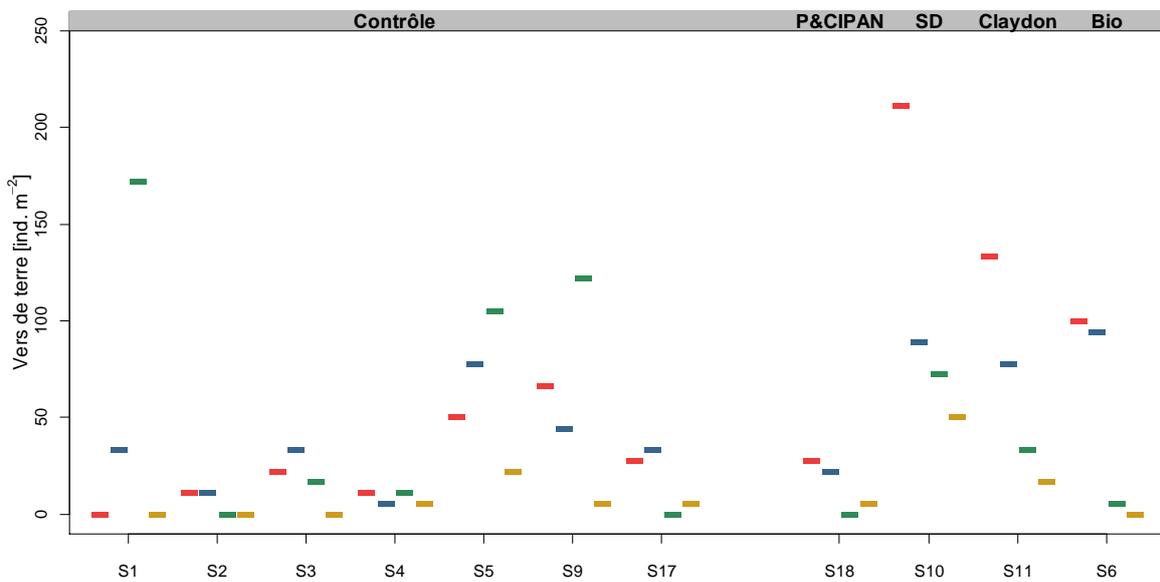
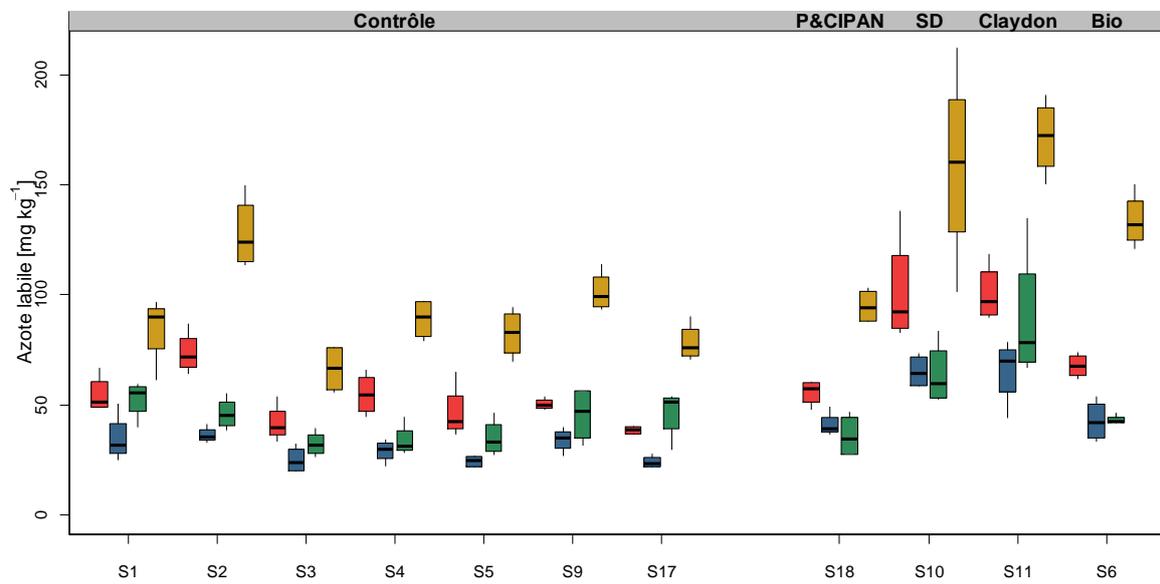
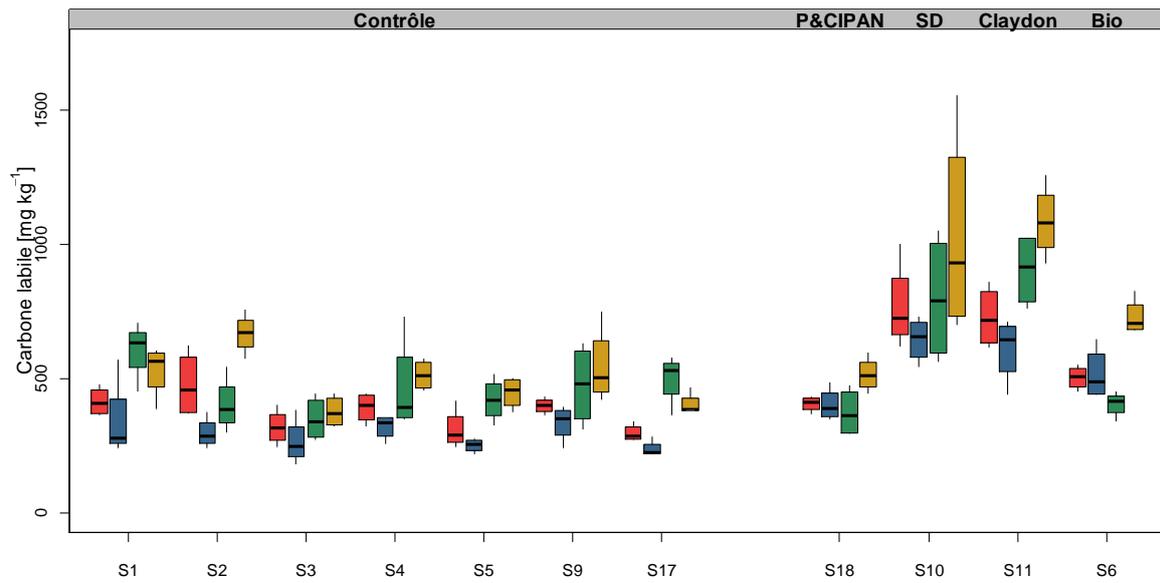
ANNEXE 4 : Box-plots des pressions écosystémiques normalisées (NES) calculées à partir d'une gamme de valeurs normales (NOR) basée sur tous les points sous agriculture conventionnelle (NES112) et d'une NOR basée sur le moment d'échantillonnage correspondant (NES28) par site pour les campagnes d'avril (rouge), de juin (bleu), d'août (vert) et d'octobre (jaune) 2016 classés selon les traitements.

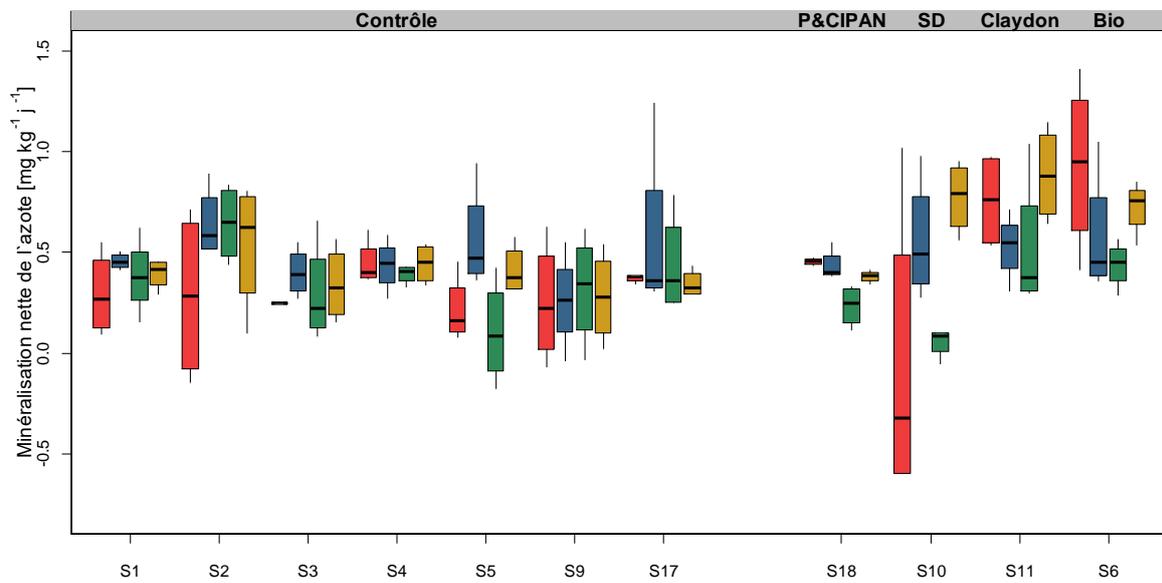
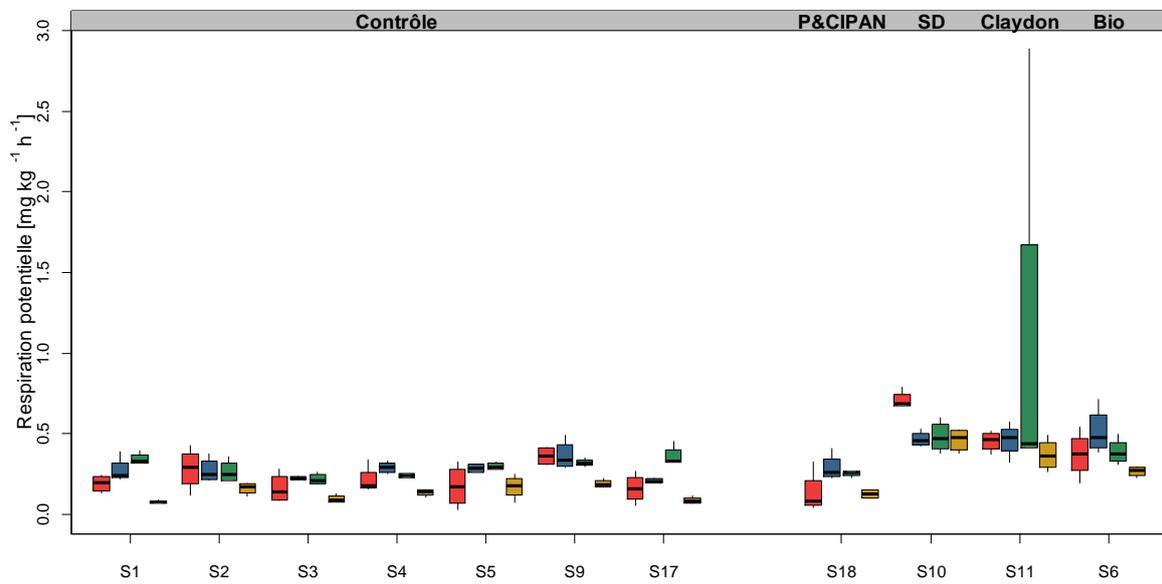
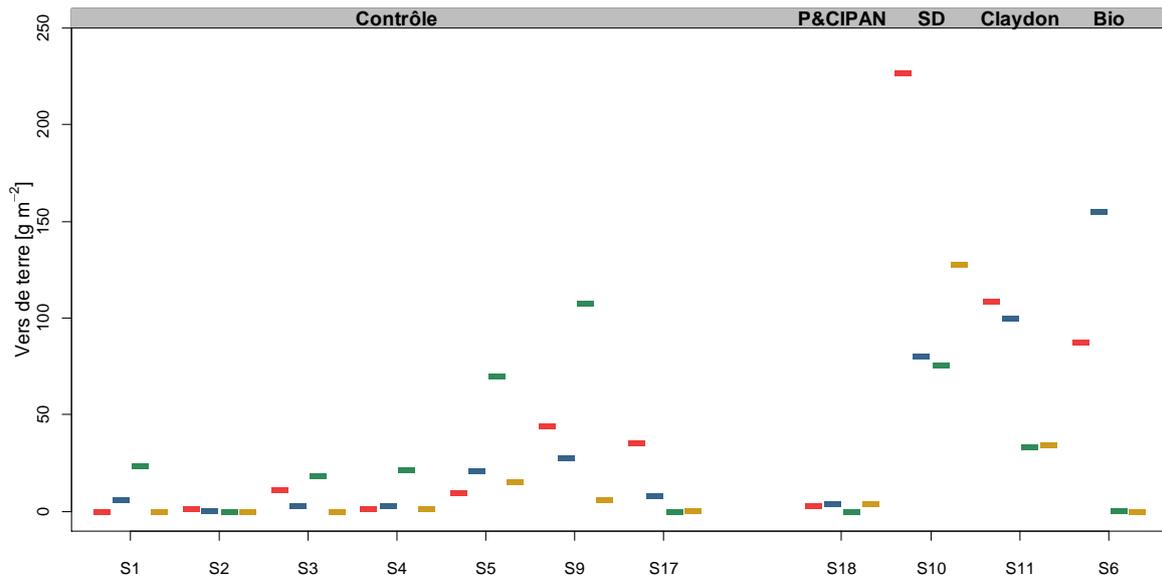


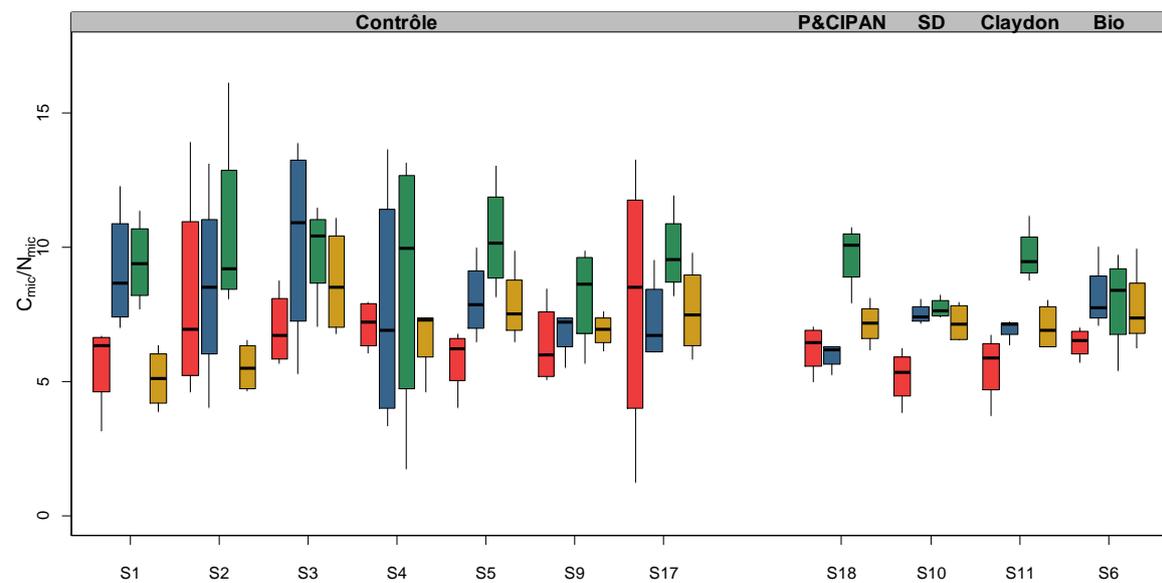
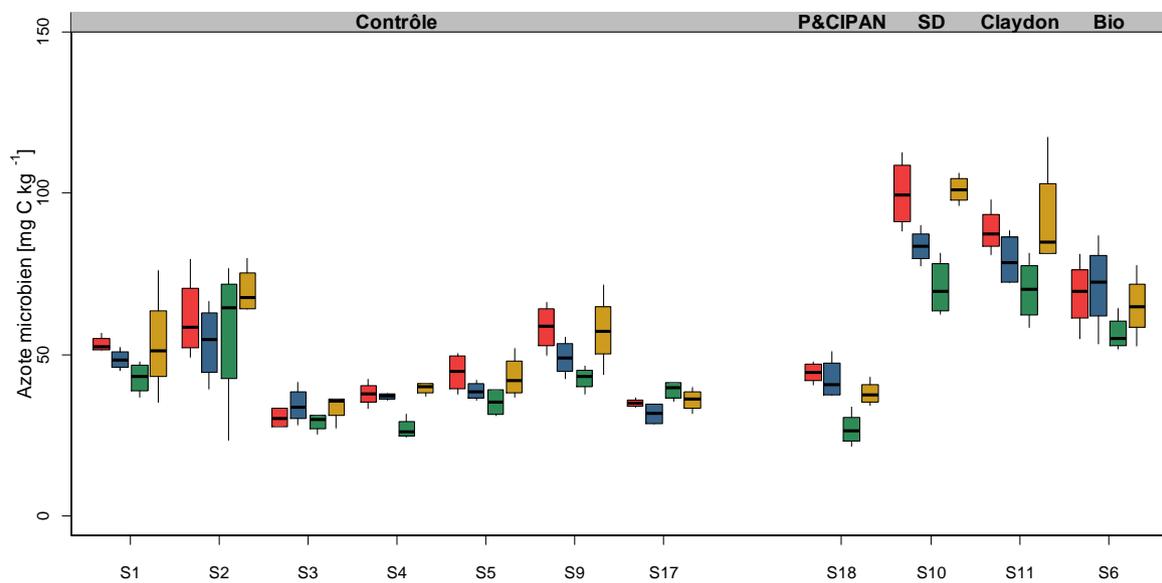
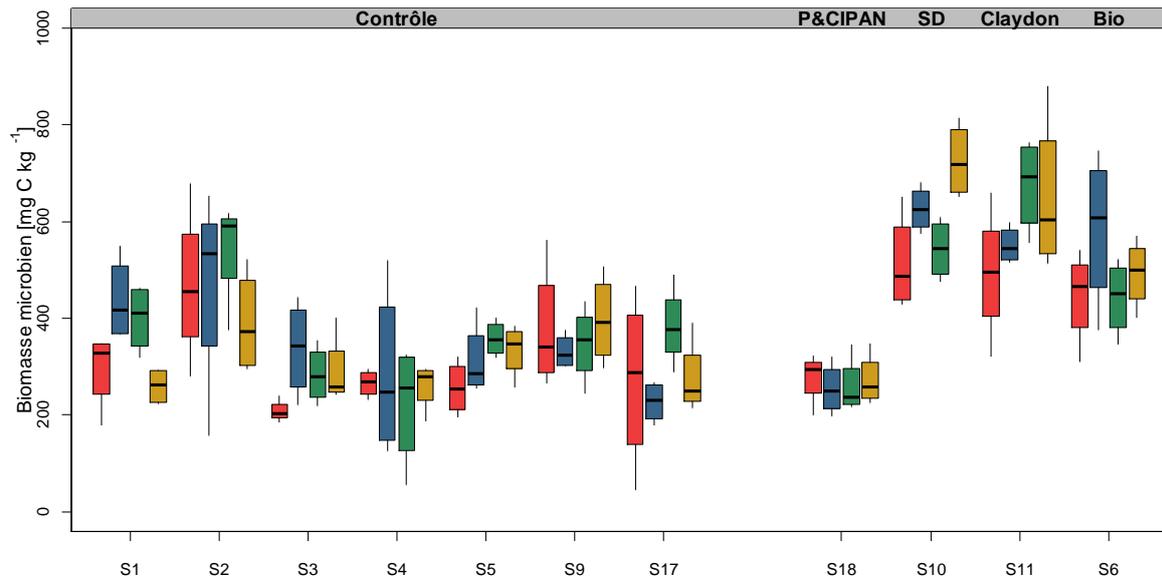
ANNEXE 5 : Box-plots des indicateurs chimiques et biologiques par site pour les campagnes d'avril (rouge), de juin (bleu), d'août (vert) et d'octobre (jaune) 2016 classés selon les traitements.

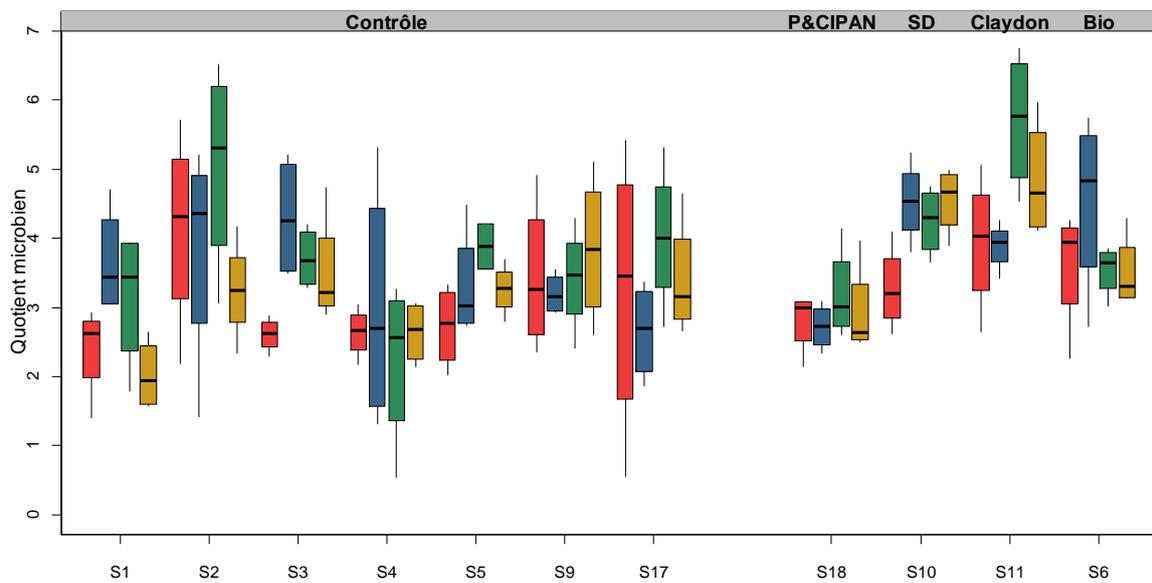
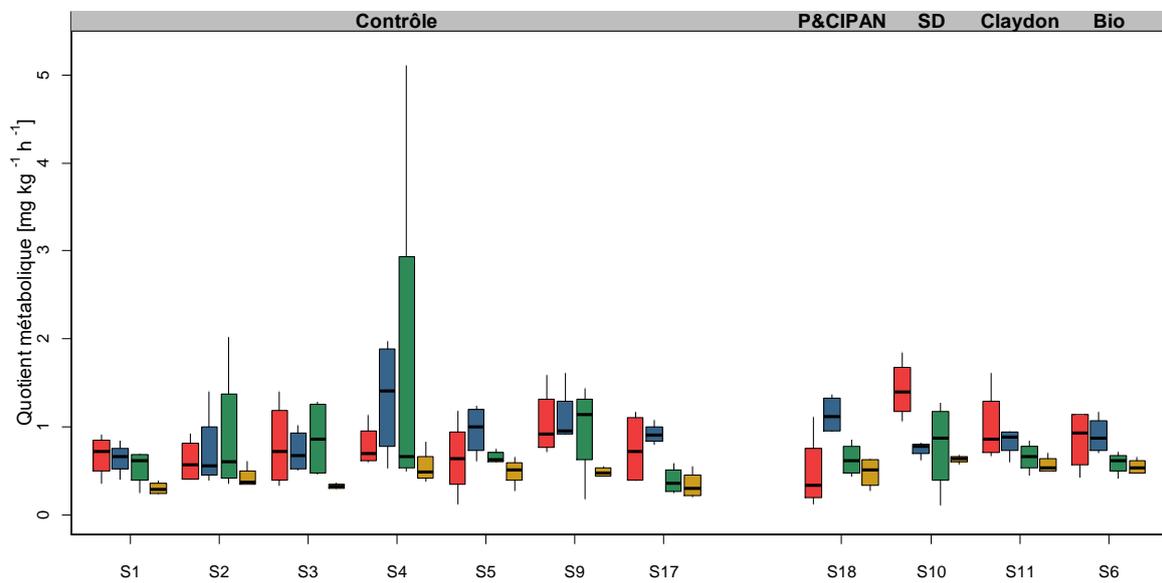
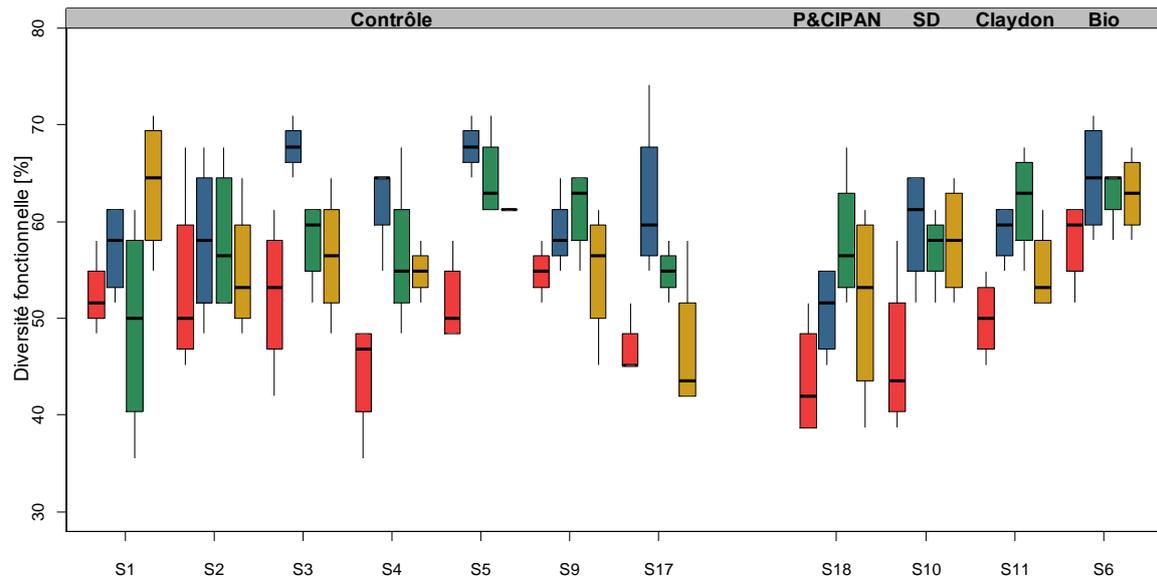












ANNEXE 6 : Corrélations entre indicateurs chimiques et entre indicateurs biologiques par moment d'échantillonnage.

Tableau 6.1: Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques (quatre moments d'échantillonnage, n=44). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	pH _{H2O}	pH _{KCl}	COT	CO_labile	C eau froide	C eau chaude	N eau froide	N eau chaude
pH _{H2O}	1							
pH _{KCl}	0.89	1						
COT	0.07	0.26	1					
CO_labile	-0.06	0.09	0.93	1				
C eau froide	-0.19	-0.14	0.18	0.19	1			
C eau chaude	-0.15	-0.03	0.72	0.75	0.43	1		
N eau froide	-0.13	0.06	0.25	0.28	-0.09	0.36	1	
N eau chaude	0.03	0.15	0.57	0.61	0.15	0.84	0.58	1

Tableau 6.2: Coefficients de corrélation entre indicateurs biologiques (quatre moments d'échantillonnage, n=44). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	Carbone microbien	Quotient microbien	C _{mic} /N _{mic}	Diversité fonctionnelle	Vers de terre	Minéralisation nette de l'azote	Respiration potentielle	Quotient métabolique
Carbone microbien	1							
Quotient microbien	0.84	1						
C _{mic} /N _{mic}	0.10	0.47	1					
Diversité fonctionnelle	0.20	0.30	0.40	1				
Vers de terre	0.32	0.15	-0.11	-0.07	1			
Minéralisation nette de l'azote	0.42	0.32	-0.03	0.20	-0.13	1		
Respiration potentielle	0.73	0.63	0.11	0.17	0.51	0.09	1	
Quotient métabolique	-0.27	-0.31	-0.23	-0.38	0.04	-0.06	-0.08	1

Tableau 6.3 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques (échantillons d'avril, n=11). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	pH _{H2O}	pH _{KCl}	COT	CO _{labile}	C eau froide	C eau chaude	N eau froide	N eau chaude
pH _{H2O}	1							
pH _{KCl}	0.83	1						
COT	-0.06	0.19	1					
CO _{labile}	-0.26	-0.07	0.93	1				
C eau froide	-0.22	-0.24	0.79	0.86	1			
C eau chaude	-0.26	0.04	0.87	0.88	0.68	1		
N eau froide	-0.61	-0.32	0.11	0.14	0.13	0.30	1	
N eau chaude	-0.21	0.15	0.84	0.81	0.58	0.99	0.33	1

Tableau 6.4 : Coefficients de corrélation entre indicateurs biologiques (échantillons d'avril, n=11). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	Carbone microbien	Quotient microbien	C _{mic} /N _{mic}	Diversité fonctionnelle	Vers de terre	Minéralisation nette de l'azote	Respiration potentielle	Quotient métabolique
Carbone microbien	1							
Quotient microbien	0.82	1						
C _{mic} /N _{mic}	-0.26	0.21	1					
Diversité fonctionnelle	0.23	0.33	0.03	1				
Vers de terre	0.73	0.41	-0.61	-0.03	1			
Minéralisation nette de l'azote	0.16	0.33	0.07	0.29	-0.03	1		
Respiration potentielle	0.85	0.51	-0.49	0.05	0.93	-0.12	1	
Quotient métabolique	-0.58	-0.27	0.54	-0.29	-0.75	0.21	-0.83	1

Tableau 6.5 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques (échantillons de juin, n=11). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	pH _{H2O}	pH _{KCl}	COT	CO _{labile}	C eau froide	C eau chaude	N eau froide	N eau chaude
pH _{H2O}	1							
pH _{KCl}	0.95	1						
COT	0.31	0.34	1					
CO _{labile}	0.22	0.18	0.92	1				
C eau froide	0.09	0.16	0.23	0.03	1			
C eau chaude	-0.10	-0.11	0.83	0.89	0.13	1		
N eau froide	-0.50	-0.54	0.23	0.22	0.29	0.43	1	
N eau chaude	-0.04	-0.02	0.86	0.89	0.16	0.96	0.42	1

Tableau 6.6 : Coefficients de corrélation entre indicateurs biologiques (échantillons de juin, n=11). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	Carbone microbien	Quotient microbien	C _{mic} /N _{mic}	Diversité fonctionnelle	Vers de terre	Minéralisation nette de l'azote	Respiration potentielle	Quotient métabolique
Carbone microbien	1							
Quotient microbien	0.86	1						
C _{mic} /N _{mic}	0.14	0.53	1					
Diversité fonctionnelle	-0.00	0.34	0.60	1				
Vers de terre	0.65	0.58	-0.09	0.33	1			
Minéralisation nette de l'azote	0.42	0.29	0.11	0.15	0.29	1		
Respiration potentielle	0.82	0.59	-0.29	-0.05	0.78	0.15	1	
Quotient métabolique	-0.55	-0.65	-0.60	-0.12	-0.28	-0.41	-0.05	1

Tableau 6.7 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques (échantillons d'août, n=11). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	pH _{H2O}	pH _{KCl}	COT	CO _{labile}	C eau froide	C eau chaude	N eau froide	N eau chaude
pH _{H2O}	1							
pH _{KCl}	0.96	1						
COT	0.06	0.21	1					
CO _{labile}	-0.16	-0.00	0.91	1				
C eau froide	-0.41	-0.25	0.20	0.31	1			
C eau chaude	-0.44	-0.31	0.63	0.64	0.75	1		
N eau froide	0.23	0.38	0.56	0.58	-0.13	-0.06	1	
N eau chaude	-0.25	-0.09	0.62	0.65	0.84	0.94	0.03	1

Tableau 6.8 : Coefficients de corrélation entre indicateurs biologiques (échantillons d'août, n=11). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	Carbone microbien	Quotient microbien	C _{mic} /N _{mic}	Diversité fonctionnelle	Vers de terre	Minéralisation nette de l'azote	Respiration potentielle	Quotient métabolique
Carbone microbien	1							
Quotient microbien	0.88	1						
C _{mic} /N _{mic}	0.01	0.35	1					
Diversité fonctionnelle	0.18	0.32	-0.05	1				
Vers de terre	0.02	-0.16	-0.16	-0.22	1			
Minéralisation nette de l'azote	0.32	0.33	0.32	-0.13	-0.37	1		
Respiration potentielle	0.78	0.69	-0.07	0.25	0.01	0.21	1	
Quotient métabolique	-0.37	-0.44	-0.23	0.01	-0.14	0.05	-0.25	1

Tableau 6.9 : Coefficients de corrélation entre indicateurs chimiques (échantillons d'octobre, n=11). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	pH _{H2O}	pH _{KCl}	COT	CO _{labile}	C eau froide	C eau chaude	N eau froide	N eau chaude
pH _{H2O}	1							
pH _{KCl}	0.86	1						
COT	-0.09	0.24	1					
CO _{labile}	-0.21	0.12	0.96	1				
C eau froide	-0.53	-0.18	0.73	0.81	1			
C eau chaude	-0.34	-0.04	0.83	0.85	0.89	1		
N eau froide	0.01	0.36	0.38	0.35	0.61	0.50	1	
N eau chaude	-0.21	0.07	0.81	0.82	0.80	0.98	0.46	1

Tableau 6.10 : Coefficients de corrélation entre indicateurs biologiques (échantillon d'octobre, n=11). Les corrélations significatives au niveau $p < 0.05$ sont mis en gras.

	Carbone microbien	Quotient microbien	C _{mic} /N _{mic}	Diversité fonctionnelle	Vers de terre	Minéralisation nette de l'azote	Respiration potentielle	Quotient métabolique
Carbone microbien	1							
Quotient microbien	0.85	1						
C _{mic} /N _{mic}	0.07	0.41	1					
Diversité fonctionnelle	0.18	-0.19	-0.17	1				
Vers de terre	0.71	0.59	0.17	0.09	1			
Minéralisation nette de l'azote	0.87	0.64	-0.03	0.25	0.49	1		
Respiration potentielle	0.98	0.81	0.11	0.19	0.77	0.86	1	
Quotient métabolique	0.73	0.59	0.13	0.11	0.64	0.68	0.83	1

ANNEXE 7 : mail synthétisant la demande spécifique de la DEMNA pour la participation de l'équipe CARBIOSOL à la mise à jour de l'EEW2016

Teneurs et Stocks COT pour le TBE2016 de l'EEW

 SUPPRIMER  RÉPONDRE  RÉPONDRE À TOUS  TRANSFÉRER 



ENGELS Patrick <patrick.engels@spw.wallonie.be>

Marquer comme non lu

À : Bas van Wesemael; Caroline Chartin;

Cc : GOIDTS Esther <esther.goidts@spw.wallonie.be>; MAES Emmanuel <emmanuel.maes@spw.wallonie.be>;

Bonjour Caroline, Dag Bas,

Nos coups de fil d'hier et de la semaine prochaine avaient comme but de voir ce qui était possible en vue d'une réunion que je viens d'avoir avec l'EEW, en particulier avec Emmanuel Maes.

En fonction de ce qui est possible pour vous, voilà ce qui est souhaité :

- A) Une carte des teneurs en COT actuelles (base : données RéQuaSud, voire avec les données de Carb(i)osol, traitées par méthodologie Carbiosol pour cultures et prairies ; données IPRFW pour forêts traitées par méthodologie Carbiosol ; période 2004-2014 pour les deux jeux de données – Ok pour Hugues Lecomte (à qui vous pouvez dès à présent commander les données), en attente d'Ok de la part de Viviane Planchon).

Nous souhaiterions :

- o Un raster geodataset dans lequel les données sont exprimées en % avec deux chiffres derrière la virgule
- o Les boxplot des dix régions agricoles pour trois occupations
- o Les statistiques descriptives
- o Un raster dataset avec les quatre occupations du sol (cultures, prairies, forêts et solde)

- B) Une carte des teneurs en COT historiques (base : données Aardewerk-Wallonie dont je vous transmets un fichier correct sous peu, données traitées par la méthodologie Carbiosol ; laps de temps février 1949-juillet 1972)

Nous souhaiterions :

- o Un raster geodataset dans lequel les données sont exprimées en % avec deux chiffres derrière la virgule
- o Les statistiques descriptives
- o Les boxplot des dix régions agricoles pour trois occupations

- Différence entre B) et A)

Nous souhaiterions :

- o Un raster geodataset dans lequel les données sont exprimées en % avec deux chiffres derrière la virgule
- o Les statistiques descriptives
- o Les boxplot des dix régions agricoles pour trois occupations

Dans la mesure de vos disponibilités ainsi que pour étoffer le travail qui pourra se retrouver également dans les rapports de subvention, vous pouvez faire un travail semblable pour les stocks :

- C) Une carte des stocks actuels, en utilisant les DA que vous avez mesurées ou que vous avez calculées (PTF de Hollis *et al.*)
Nous souhaiterions :
 - Un raster geodataset dans lequel les données sont exprimées en T/ha avec trois chiffres derrière la virgule
 - Les statistiques descriptives
 - Les boxplot des dix régions agricoles pour trois occupations
- D) Une carte des stocks historiques, en utilisant les DA que vous avez mesurées ou que vous avez calculées (PTF de Hollis *et al.*)
Nous souhaiterions :
 - Un raster geodataset dans lequel les données sont exprimées en T/ha avec trois chiffres derrière la virgule
 - Les statistiques descriptives
 - Les boxplot des dix régions agricoles pour trois occupations
- Différence entre D) et C)

En plus, vous êtes invités à rédiger un rapport méthodologique qui accompagnera la fiche qui sera rédigée par Emmanuel Maes. Ce rapport sera accessible en ligne et est formalisé sous la forme d'un canevas qui vous sera transmis par Emmanuel Maes. Bien entendu toute figure ou toute carte à laquelle vous auriez collaboré portera la mention : *TBE2016 - Sources : UCL-ELIC-TECLIM ; REQUASUD ; SPW-DGO3-DNF (IPRFW).*

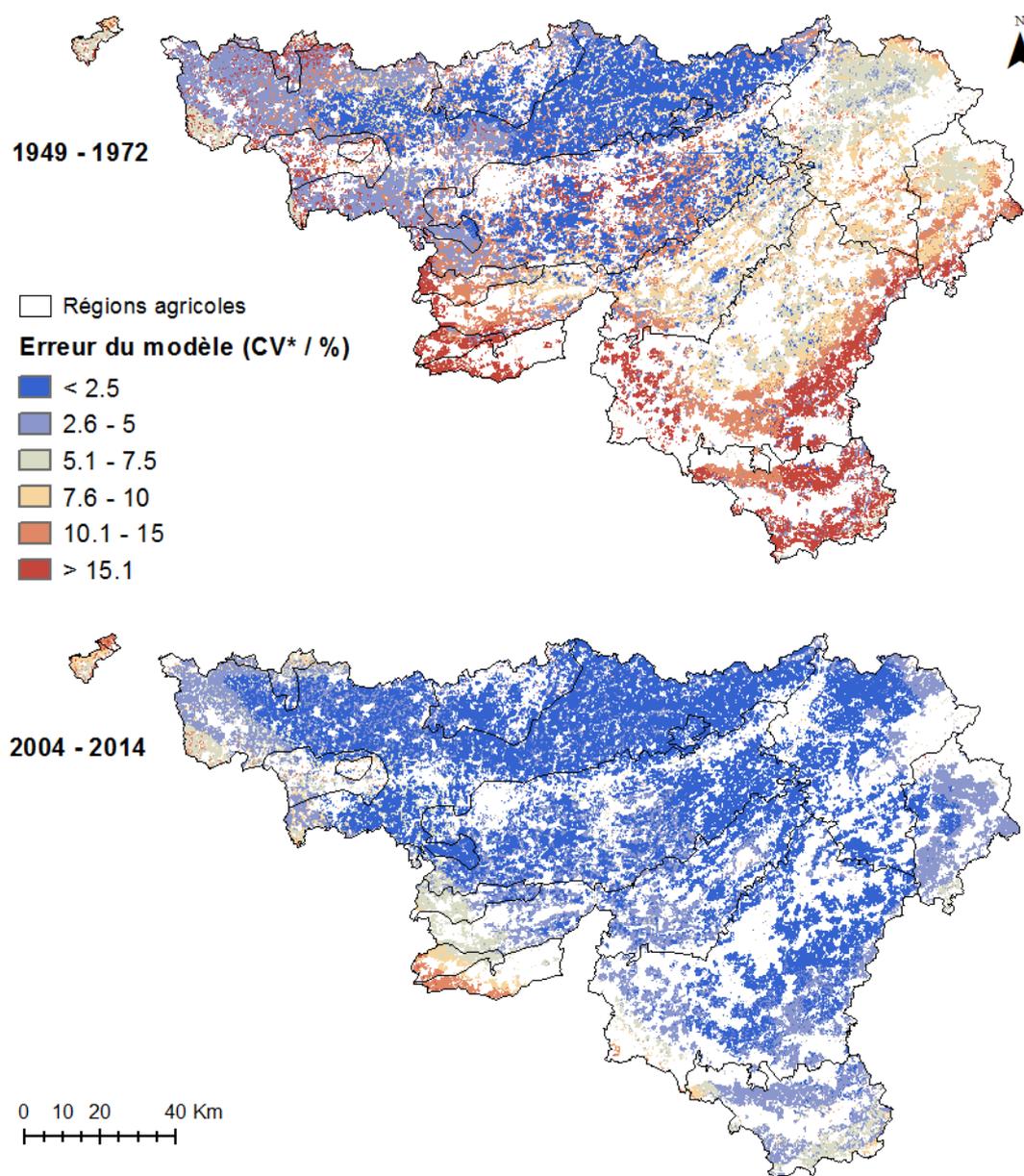
Le délai est prolongé jusqu'au 15 octobre.

Nous espérons que cette collaboration permettra d'encore mieux valoriser votre travail. Dans un esprit de collaboration et d'efficacité, pourriez-vous utiliser ces deux courriels dans toute correspondance : emmanuel.maes@spw.wallonie.be et patrick.engels@spw.wallonie.be ?

Bonne après-midi,
Patrick
Emmanuel Maes

ANNEXE 8 : Produits fournis pour l'EEW2016 - Cartes des erreurs standard de modélisation (sous forme du coefficient de variation CV*) des teneurs en COT sous cultures et prairies pour les périodes 1949-1972 et 2004-2014

* CV = $ES / M \times 100$ (avec ES = erreur standard du modèle ; M = valeur moyenne modélisée)



Sources : UCL - ELI - TECLIM ; PCNSW ; REQUASUD (licence A09/2016)

ANNEXE 9 : Produits fournis pour l'EEW2016 - Cartes des teneurs en COT et des erreurs standard de modélisation (sous forme du coefficient de variation CV*) pour les sols sous forêts pour les périodes 1949-1972 (Horizon de surface) et 2004-2014 (0-20cm).

* CV = ES / M x 100 (avec ES = erreur standard du modèle ; M = valeur moyenne modélisée)

