

**Subvention du Service Public de Wallonie
pour l'Université de Liège et l'Université Catholique de Louvain**

**Développement d'indicateurs
de la qualité biologique et du carbone organique
du sol pour l'évaluation de l'état des sols
en Wallonie : valorisation des acquis et transfert
vers les utilisateurs (CARBIOSOL 5)**

RAPPORT FINAL

Mars 2019

Caroline CHARTIN^{1*}, Quentin VINCENT^{2*}, Bas VAN WESEMAEL¹, Monique CARNOL²

¹ TECLIM – EARTH & LIFE INSTITUTE - ELIC, PLACE LOUIS PASTEUR, 1348 LOUVAIN-LA-NEUVE

² LABORATOIRE D'ÉCOLOGIE VÉGÉTALE ET MICROBIENNE, INBIOS, BOTANIQUE B22, CHEMIN DE LA VALLÉE 4,
4000 LIÈGE

*contribution équivalente

Table des matières

Table des matières	2
1. Introduction	3
1.1 Contexte.....	3
1.2 Acquis	4
1.3 Objectifs.....	5
2. Analyser et synthétiser l'ensemble des résultats acquis au cours des conventions précédentes ...	6
2.1. Synthèse de l'ensemble des résultats acquis au cours des subventions précédentes.....	6
2.2 Base de données intégrée « CARBIOSOL – indicateurs biologiques des sols agricoles wallons »	15
Document technique associé à la BDD CARBIOSOL	17
2.3. Liste d'indicateurs de référence de la qualité biologique des sols en Wallonie et méthodes analytiques associées.....	19
3. Créer les bases de données et les outils dérivés du référentiel wallon pour l'analyse régionale et parcellaire de la qualité biologique des sols	21
3.1 Bases de données centralisatrices.....	21
3.2 Outils dérivés	22
3.2. Méthode d'estimation de la durabilité de la production de la biomasse au sens de la protection de la matière organique des sols et de la réduction des émissions de CO2	23
3.2.1. Prise en compte, dans les calculs d'émission de GES, des changements de stocks de carbone du sol dû à l'utilisation de biomasse pour la production d'électricité.	23
3.2.2 Durabilité de la production de la biomasse au sens de la protection de la matière organique des sols.....	26
4. Mise à disposition de l'outil vers les laboratoires provinciaux wallons en vue de la délivrance d'un premier prototype de bulletins analytiques sur la qualité biologique des sols	30
4.1 Les indicateurs biologiques	30
4.2 Les fractions de carbone organique	31
5. Communiquer et vulgariser les résultats	31
5.1 Communications scientifiques	31
5.2 Communication transversale avec les projets de recherche/vulgarisation en lien avec la qualité du sol	32
5.3 Vulgarisation.....	33
6. Liste des livrables	34
Références.....	36
Annexes.....	43

1. Introduction

1.1 Contexte

La **qualité du sol** a été définie comme «**La capacité d'un type de sol spécifique à fonctionner**, dans les limites d'un écosystème naturel ou géré, pour maintenir la productivité des plantes et des animaux, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air, et soutenir la santé et l'habitation humaines» (Karlen *et al.*, 1997). Or, les sols sont considérés comme une ressource non renouvelable à l'échelle des générations humaines (Lal, 2009). Une prise de conscience de l'ampleur des effets des activités humaines sur les sols a mené les décideurs à élaborer des **outils pour le suivi de la qualité des sols**, afin d'évaluer et de surveiller l'évolution de la qualité des sols, de limiter leur dégradation et de favoriser des pratiques qui permettent une utilisation durable des sols. C'est dans ce cadre qu'est né le **projet de recherche CARBIOSOL** (juillet 2013 – janvier 2019, financement SPW-DGO3).

Parmi ces outils d'évaluation de la qualité des sols, le **carbone organique totale du sol (COT)** est une mesure fondamentale, liée à différents processus physiques, chimiques et biologiques du sol. En Wallonie, il est mesuré systématiquement lors des analyses de sols effectuées via les laboratoires de REQUASUD, mais également grâce au réseau de surveillance CARBOSOL (Goidts *et al.*, 2009), consacré au suivi des stocks de COT dans les sols agricoles. Cependant, la dynamique du COT est lente et ses changements ne sont détectables qu'après plusieurs années ou décennies (Goidts and van Wesemael, 2007). De plus, le carbone organique du sol n'est nullement homogène (von Lützwow *et al.*, 2007). Ainsi, de nouveaux indicateurs, plus réactifs et complémentaires, ont été sélectionnés et mesurés dans le cadre du projet CARBIOSOL :

- La mesure de **deux fractions du carbone organique** aide à distinguer les tendances à long terme (taux de renouvellement de 100 ans ou plus), importants pour la stabilisation de la matière organique (fraction < 20µm) des processus liés à la transformation de la matière organique, impliqués dans la fertilité actuelle des sols (fraction > 20µm) (Trigalet *et al.*, 2017; van Wesemael *et al.*, 2019);
- Les organismes du sol interviennent directement dans la dégradation de la matière organique, et leur activité est par conséquent liée à la disponibilité des éléments nutritifs. Ces **indicateurs biologiques** (respiration potentielle, biomasse microbienne, minéralisation nette de l'azote, potentiel métabolique des bactéries, vers de terre, quotients microbien et métabolique) fournissent des informations complémentaires au COT (Krüger *et al.*, 2017, 2018b).

En Wallonie, un réseau de laboratoires provinciaux (réseau REQUASUD) fournit des analyses de sol pour les agriculteurs. Jusqu'à présent, l'évaluation des sols comprend des paramètres chimiques et physiques (Genot *et al.*, 2011), mais une demande croissante concerne des mesures liées à l'activité biologique des sols. Le projet de recherche CARBIOSOL répond à ce besoin par l'étude des fractions de carbone et des indicateurs biologiques. Les quatre subventions précédentes (CARBIOSOL 1 à 4 ; 2014, 2015, 2016 et 2017) ont permis d'acquérir de nombreuses mesures de ces indicateurs dans différents sites agricoles sous cultures et sous prairies. Ainsi, l'**objectif général** de cette

subvention porte sur la **valorisation des acquis** par le **transfert** d'outils (méthodologies, bases de données, outils d'interprétations) **vers les utilisateurs** (laboratoires d'analyse, questionnaires et agriculteurs).

1.2 Acquis

Au cours des subventions successives **CARBIOSOL 1 à 4**, les données collectées pour les indicateurs biologiques ont permis (i) d'explorer la variabilité au sein de deux unités paysagères contrastées (Ardennes, Région Limoneuse) et d'établir le caractère discriminatoire des indicateurs biologiques sélectionnés, (ii) de mesurer la variabilité spatiale sous cultures et prairies à l'échelle de la Wallonie, (iii) de mesurer la variabilité saisonnière sous cultures, et (iv) d'évaluer l'effet de la gestion agricole. Des gammes de valeurs ont été établies permettant de comparer la qualité biologique d'un sol sous agriculture conventionnelle, en conversion et biologique. Pour le carbone organique, les travaux se sont concentrés sur l'étude des fractions stables et labiles ainsi que la cartographie du COT. Les effets de la gestion agricole à court terme se révèlent importants pour la fraction labile, tandis que l'occupation/gestion à long terme et le type de sol influencent la fraction stable. La cartographie du COT (teneurs et stocks) et du carbone stable (teneurs) à l'échelle de la Wallonie ont permis d'établir un bilan synthétique régional de la qualité des sols et de cibler les zones les plus vulnérables.

Le traitement des données et la production de cartes et d'outils graphiques de synthèse ont été automatisés par la production de scripts informatiques qui facilitent les mises à jour lors de l'acquisition de nouvelles données.

Des partenariats ont été établis avec plusieurs acteurs de terrain (REQUASUD, CRA-w, Greenotec), permettant de :

- présenter les indicateurs et les méthodes d'analyses auprès des responsables des laboratoires d'analyses de sols du réseau REQUASUD ;
- mettre à jour les cartes des teneurs (données de REQUASUD) et stocks en COT pour la Wallonie (disponibles sur le geoportail du SPW), ainsi que les informations pour l'Etat de l'environnement Wallon (DGO3, 2017) ;
- constituer une première librairie spectrale (n= 325) pour calibrer la mesure des fractions de carbone organique sur base d'analyses spectroscopiques proche infra-rouge (SPIR), effectuées ici au laboratoire de la Province de Liège (CPL-PROMOGEST) affilié au réseau REQUASUD;
- organiser d'un "Workshop on Soil Biological Monitoring: experiences from neighbouring countries"
- organiser une demi-journée autour de la présentation des indicateurs biologiques auprès des agriculteurs avec un recensement de leurs pratiques agricoles (asbl Greenotec) et ;
- identifier des agriculteurs (affiliés à l'asbl Greenotec) et des acteurs de terrain (CRA-w et RegenacterrE) mettant à disposition des parcelles pour le projet de recherche.
- étudier les sites d'expérimentations à long terme menées par le CRA-w, ainsi que deux sites pilotes de l'asbl Regenacterre.

1.3 Objectifs

Vu les données acquises et l'avancement des réflexions via les collaborations établies, la finalité de ce projet est de **synthétiser les connaissances acquises afin d'optimiser et d'autonomiser l'utilisation** par les gestionnaires et les laboratoires provinciaux **des indicateurs et outils développés** dans le projet CARBIOSOL.

Ainsi, les objectifs de ce projet sont de:

- 1/ analyser et synthétiser l'ensemble des résultats acquis au cours des subventions précédentes ;
- 2/ créer des bases de données et des outils dérivés ;
- 3/ mettre en œuvre le transfert de l'outil vers des laboratoires provinciaux ;
- 4/ communiquer et vulgariser les résultats.

Ces objectifs sont schématisés dans la figure 1 ci-dessous.

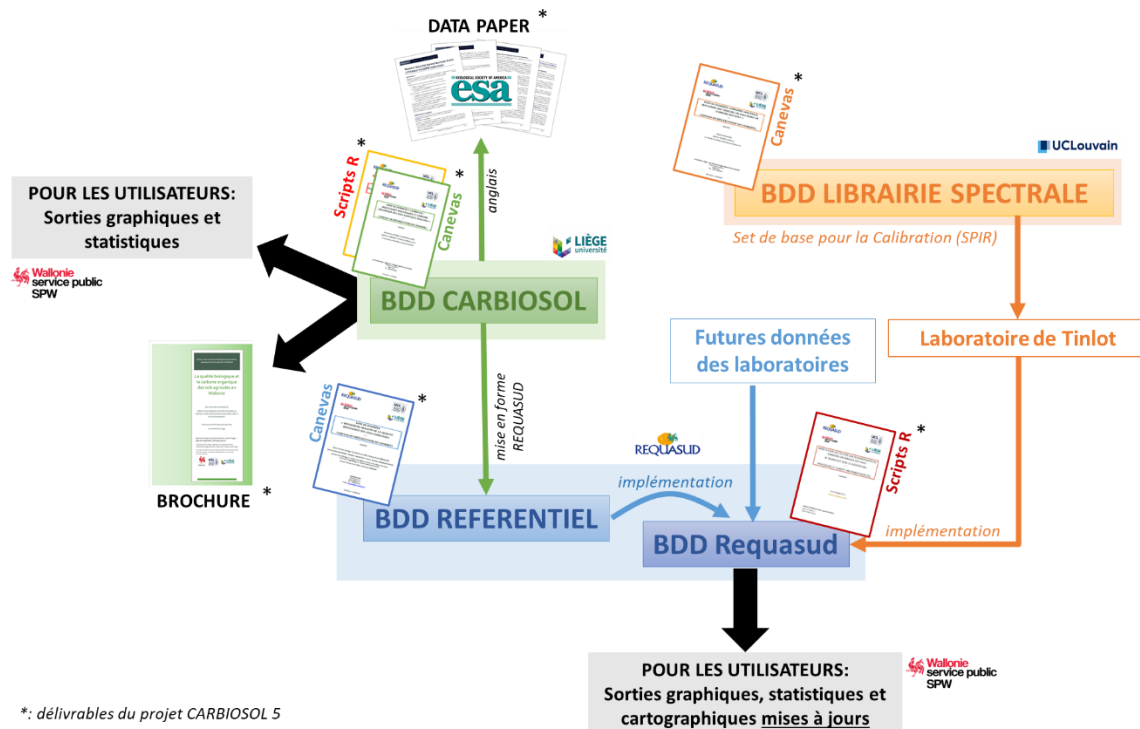


Figure 1: Schéma général de la création des bases de données (BDD) et des documents associés dans le projet CARBIOSOL 5.

2. Analyser et synthétiser l'ensemble des résultats acquis au cours des conventions précédentes

2.1. Synthèse de l'ensemble des résultats acquis au cours des subventions précédentes

En Wallonie, les données sur les fractions de carbone et les indicateurs biologiques provenant des sols agricoles n'étaient jusqu'à présent pas disponibles. Le projet CARBIOSOL visait à élargir un réseau de surveillance des sols wallon en intégrant des indicateurs biologiques et des fractions de carbone des sols pour les sols de terres cultivées et de prairies. Des échantillons de sol ont été analysés pour deux unités paysagères agricoles contrastées (en 2013 et 2014 ; Carbiosol 1 ; Chartin *et al.*, 2015, Trigalet *et al.*, 2017, van Wesemael *et al.* 2019), dans dix unités paysagères agricoles localisées dans cinq régions agricoles (en 2015 ; Carbiosol 2 ; Krüger *et al.*, 2015), au cours de quatre périodes d'échantillonnage dans des sols de culture (en 2016 ; Carbiosol 3 ; Chartin *et al.*, 2016), sous sept types de cultures (en 2017 ; Carbiosol 4 ; Krüger *et al.*, 2018a, Vincent *et al.*, en préparation) et sous quatre modes de gestion des terres (en 2017 ; Carbiosol 4 ; Krüger *et al.*, 2018a, Vincent *et al.*, en préparation). Ainsi, la teneur en carbone organique du sol (en tant que total, fraction fine <20 µm et fraction grossière > 20 µm), teneur en carbone extractible et azote dans l'eau froide et chaude, azote total, pHKCl, pHH₂O, potentiel de respiration, biomasse microbienne de carbone et d'azote, la minéralisation de l'azote, le potentiel métabolique des bactéries du sol, la densité et la biomasse des vers de terre et deux quotients écophysiologiques (quotient métabolique et microbien) ont été mesurés pour un total de 415 échantillons dans 124 sites de culture et 66 sites de prairie, respectivement. Pour 172 échantillons, les analyses conjointes des fractions de carbone et les indicateurs biologiques sont disponibles (Vincent *et al.*, soumis dans Ecology).

2.1.1. Gammes de valeurs et différences entre deux unités paysagères agricoles pour les indicateurs biologiques

Afin de disposer des premières valeurs pour les indicateurs biologiques de la qualité des sols, ceux-ci ont été mesurés dans deux unités paysagères agricoles (LSU) contrastées ; les cultures en région limoneuse et les prairies en Ardenne (Chartin *et al.*, 2015, Krüger *et al.*, 2018b; Carbiosol 1). **Les valeurs de tous les indicateurs biologiques étaient plus élevées dans les sols sous prairies (Ardenne) que dans les sols sous cultures (Région Limoneuse).** De plus, l'amplitude des gammes de valeurs et la variabilité des données étaient généralement supérieures sous prairies en Ardenne que sous cultures en Région Limoneuse. Cette étude a mis en évidence la **nécessité d'établir des gammes de référence des indicateurs biologiques de la qualité du sol à des échelles spatiales pertinentes**, c'est-à-dire les LSU pour la Wallonie.

Bien que les valeurs de la littérature scientifique soient très variables, les valeurs des indicateurs biologiques mesurées en Ardenne et en Région Limoneuse étaient situées dans le même ordre de grandeur que les données publiées. Afin de synthétiser les mesures des indicateurs

biologiques sous une forme synthétique, le calcul de scores compréhensifs, résumant les données en une seule valeur, a été proposé. Le but était de créer des cartes simples pour visualiser la qualité biologique du sol en Wallonie. **Tout comme les indicateurs biologiques individuels, le type d'occupation du sol avait un effet sur le score compréhensif, traduisant une modification de la qualité des sols.** Par contre, le calcul du score compréhensif résultait en une perte d'information conséquente et cette approche n'a pas été poursuivie dans les phases ultérieures du projet. C'est pourquoi, une présentation visuelle en plot radar a été proposée (Figure 2). Chaque indicateur biologique est montré sur un axe du plot radar ; les axes vont du centre (minimum, 0%) à l'extrémité du plot (maximum, 100%) et contiennent donc 100% des valeurs attendues sous culture ou sous prairie en Wallonie. Ces graphiques fournissent des renseignements sur la distribution de l'ensemble des valeurs et permettant une comparaison rapide de la qualité biologique selon l'occupation du sol.

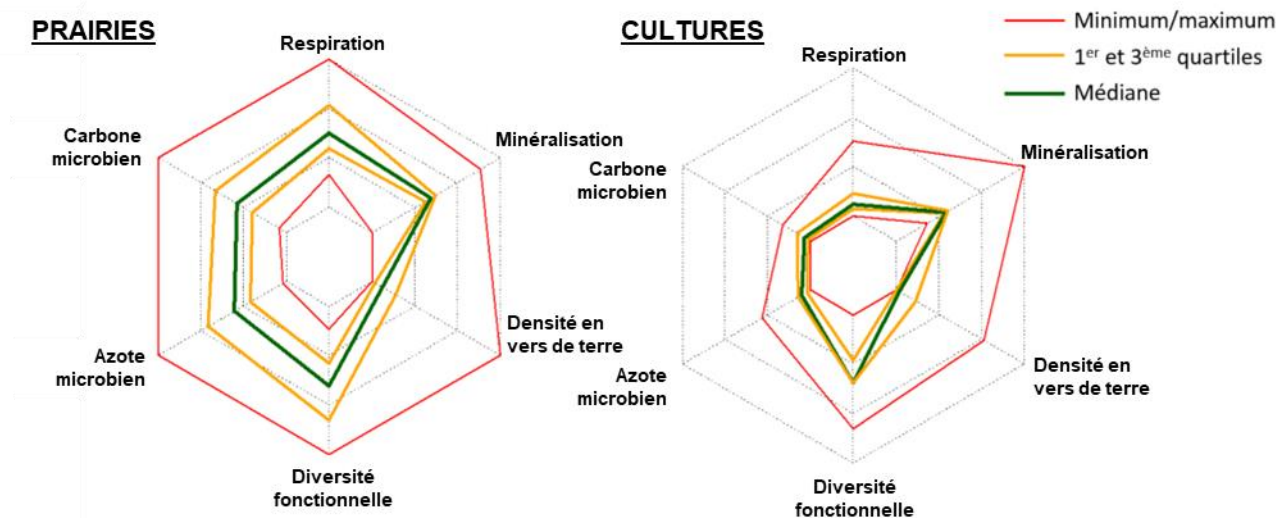


Figure 2 : Exemple de plot radar pour les prairies et les cultures (Krüger *et al.*, 2015).

2.1.2. Variabilité spatiale et temporelle des indicateurs

Les valeurs surestimées de COT de la base de données AardeWerk (1955) ont été corrigées, démontrant que les stocks de COT pour cette date, en cultures et prairies, étaient en deçà des premières estimations. Ainsi, **la baisse observée des stocks de 1955 à 2005 dans les cultures est souvent non-significative dans les unités paysagères étudiées (en moyenne -3 tC.ha^{-1}), tandis qu'une augmentation importante et significative a eu lieu dans les sols pour les unités paysagères de prairies étudiées (moyenne de $+19,9 \text{ tC.ha}^{-1}$) (CARBIOSOL 1).** De 2005 à 2013, on note une faible augmentation, bien que significative, des stocks de COT dans une unité paysagère de cultures en Région Limoneuse ($+4,9 \text{ tC.ha}^{-1}$, soit $1,4 \text{ gC.kg}^{-1}$) pouvant être le résultat de MAE anti-érosive et anti-pollution appliquées depuis en Région Wallonne.

Le réseau de mesure CARBIOSOL initié entre 2005 et 2008 a été complété de 163 points d'observation en 2013 et 2014 (CARBIOSOL 1). Ces données pour la SAU et celles de l'IPRFW (l'Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie) ont permis d'établir des gammes de valeurs (teneurs et stocks en carbone organique) pour les différentes occupations de sols (cultures, prairies et forêts), par région agricole. Elles ont également permis de modéliser la variation spatiale du carbone de ces trois occupations de sol grâce à des Modèles Additifs Généralisés (GAM) utilisant des co-variables (morphométriques, pédologiques, climatiques et anthropiques) influençant la variabilité du carbone. **Les cartes résultantes reflètent des variations spatiales contrôlées par des co-variables influençant le bilan C dans les sols, comme l'occupation de sols, la teneur en argiles et limons fins liée à la fraction stable du carbone, l'altitude, le climat, le drainage, et/ou différents attributs morphométriques.** Le pouvoir prédictif des modèles a été évalué par validation externe, donnant lieu au calcul de coefficient de détermination r^2 de 0.62 pour les cultures, 0.38 en prairies et 0.35 en forêts. La carte de prédiction finale a permis d'ajuster un modèle robuste de la variation spatiale de la densité apparente des sols cultivés et sous prairies ($r^2=0.70$).

Vu les différences importantes observées pour les indicateurs biologiques de la qualité des sols pour les deux LSU étudiées dans la première phase du projet, un échantillonnage extensif a été réalisé à travers 10 LSU, localisées dans cinq régions agricoles. L'analyse de l'influence de facteurs définissant les LSU (utilisation des sols, texture et région agricole) et / ou paramètres chimiques du sol (carbone organique du sol, azote total et pHKCl) a révélé que l'utilisation des sols était le principal, voir le seul facteur expliquant la variabilité spatiale des données, c'est-à-dire les différences entre les indicateurs biologiques des 10 LSU. Par conséquent, **des gammes de références distinctes devraient être construites pour les prairies et les cultures**, mais une subdivision supplémentaire par la texture du sol ou la teneur en carbone organique, par exemple, n'est pas nécessaire (Krüger *et al.*, 2018).

L'étude de la variabilité saisonnière pour les cultures en 2016 a montré que **le moment d'échantillonnage a un effet significatif sur tous les indicateurs biologiques mesurés, à l'exception de l'abondance des vers de terre** (Krüger *et al.*, 2018b). Selon l'indicateur biologique, les valeurs étaient plus faibles en avril (potentiel métabolique, C_{mic} / N_{mic}) ou en octobre (potentiel de respiration, quotient métabolique), et le plus élevées en juin (potentiel métabolique, quotient métabolique) ou en août (C_{mic} / N_{mic} , quotient microbien, potentiel de respiration) (Fig. 2). Bien que significatives, les différences saisonnières dans les valeurs moyennes à travers les 11 terres cultivées étaient faibles pour microbienne biomasse et la minéralisation nette de l'azote.

Les données des mesures dans les sites agricoles (sols sous cultures) de 2015 et 2016 (**variabilité spatiale**), ainsi que les données sur la **variabilité saisonnière** ont été utilisées pour **calculer des gammes de référence** pour la Wallonie (Krüger *et al.*, 2018, Vincent *et al.*, 2019 - brochure). Pour chaque indicateur, une distribution des valeurs a été calculée à partir de la médiane et de la somme de la variabilité spatiale (données de 2015) et saisonnière (données de 2016). Il s'agit de la racine carrée de la somme des variances spatiale et saisonnière. Ensuite, cinq catégories ont été

déterminées sur base de la distribution de ces valeurs calculées (5^{ème} quantile¹, 25^{ème} quantile, 75^{ème} quantile et 95^{ème} quantile) (Krüger *et al.*, 2018b). Afin de faciliter l'interprétation de ces gammes de référence, elles sont chacune séparée en cinq catégories « valeurs très faibles », « valeurs faibles », « valeurs moyennes », « valeurs élevées » et « valeurs très élevées » (Figure 3).

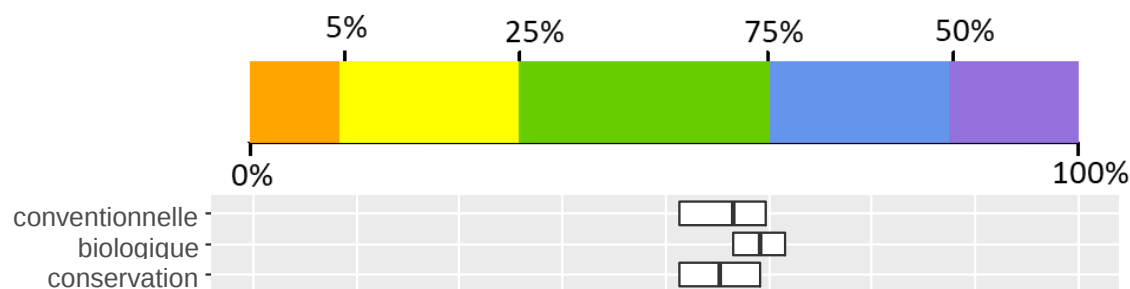


Figure 3 : Schéma général d'une gamme de référence et de la comparaison des pratiques agricoles. Ce graphique a été réalisé pour chaque indicateur.

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 de la fraction labile (CARBIOSOL III). **La fraction labile apparait responsable de la majeure partie de la variabilité spatiale et temporelle du COT.**

2.1.3. Effets du type d'exploitation des sols cultivés sur la qualité des sols agricoles

Le type d'exploitation avait un effet significatif sur le carbone extrait à l'eau froide, le carbone extrait à l'eau chaude et l'azote extrait à l'eau chaude, ainsi que sur six des huit indicateurs biologiques (vers de terre, respiration potentielle, carbone microbien, potentiel métabolique, quotient métabolique, quotient microbien) (CARBIOSOL 4 ; Krüger *et al.*, 2018a). En général, les valeurs augmentaient dans l'ordre suivant : agriculture conventionnelle < agriculture de conservation < conversion biologique < agriculture biologique. Toutefois, **les différences entre types d'exploitation étaient faibles en comparaison à la variabilité spatiale et saisonnière sur les indicateurs biologiques** (CARBIOSOL 4).

La comparaison de parcelles sous différentes pratiques agricoles aux gammes établies donne un exemple de l'utilisation des gammes de valeurs pour l'évaluation de la qualité biologique. Par exemple, les sols sous cultures de conservation ont, en moyenne, des teneurs élevées en carbone microbien par rapport à la gamme de référence, ce qui n'est pas le cas des sols sous cultures biologiques ou conventionnelles.

¹ Quantile : valeur qui divise un jeu de données en intervalles contenant le même nombre de données. Par exemple, le 25^{ème} quantile partage l'échantillon en 25% des données sous lui, et les 75% restant au-dessus de lui.

Le type d'exploitation avait un effet significatif sur la fraction grossière de carbone organique ($C > 20\mu\text{m}$; fraction la plus labile) (CARBIOSOL 4). En agriculture de conservation (sites en non-labour ou labour occasionnel) les teneurs en $C > 20\mu\text{m}$ étaient supérieures à celles observées pour les sols sous agriculture conventionnelle. Ces résultats soulignent l'influence des pratiques de conservation, et notamment la réduction du travail du sol, sur la protection de la fraction 'active' du carbone organique du sol, et de ses répercussions sur la fraction stable. De plus, le nombre d'années écoulées depuis la mise en place d'un nouveau type d'exploitation, augmente l'effet positif de cette exploitation sur la stabilisation du C. **Le rapport de la fraction grossière de C sur la fraction fine de C ($C > 20\mu\text{m}/C < 20\mu\text{m}$) est un indicateur de l'évolution récente du COT (5 à 10 dernières années).**

Pour les prairies, la fraction fine de carbone montre peu de différences entre les pratiques de gestion, indépendamment du nombre d'années écoulées depuis la mise en place. **La stabilisation du C organique dans les prairies aurait, dans bon nombre de cas, atteint sa capacité maximale** liée à la teneur en argiles et limons fins des sols. La relation entre les teneurs en argiles et limons fins et les teneurs en C stable des sols sous prairies permet d'estimer le potentiel maximum de stabilisation en C d'un sol, et donc le déficit de saturation en C stable des sols sous cultures.

Au cours de CARBIOSOL 5, les effets de l'intensité du labour, la fréquence de certains types de cultures (céréales, betteraves, pommes de terre...), la durée de mise en culture ou encore la fréquence d'application de fongicides sur les teneurs en C ont été testés à l'échelle de la Wallonie. Pour ce faire, des indicateurs ont été développés en collaboration avec le CRA-w et calculés sur base de données anonymisées du SIGEC, pour des points d'observations mesurant les teneurs en C dans la BDD CARBIOSOL. Une analyse statistique par application d'arbres de régression et de classification type Random Forest a été effectuée. Cette analyse a montré que l'intensité du travail du sol, la fréquence de mise en prairies d'un champ et la durée de mise en cultures, avaient une importance élevée dans l'explication de la variance du COT (Figure 4).

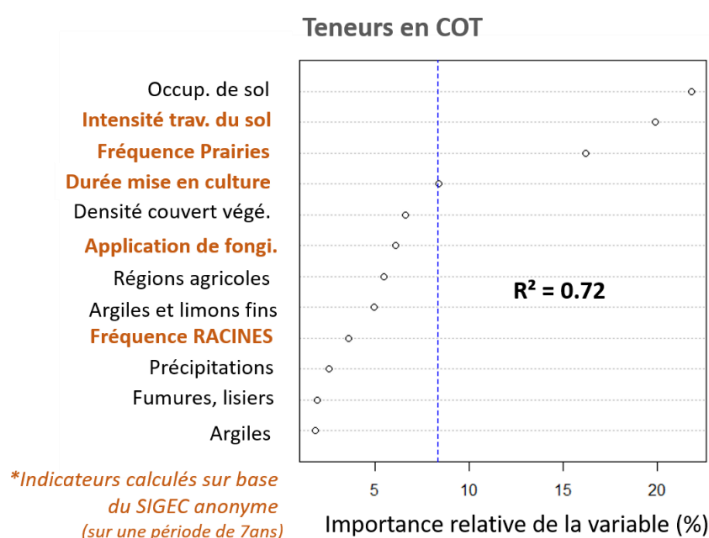


Figure 4 : Importance relative des co-variables (comprenant celles utilisées précédemment dans CARBIOSOL et les indicateurs calculés sur base du SIGEC anonyme) dans l'explication de la variance de la teneur en carbone organique total (modèle Random Forest).

Précédemment, les résultats statistiques de la variance du COT obtenus via les co-variables environnementales usuelles (modèles GAM) ont montré des pouvoirs explicatifs de la variance du COT équivalents à un R^2 de 0,62 et 0,38, respectivement en cultures et en prairies (Chartin *et al.*, 2015). Ici, pour les cultures et prairies confondues, le modèle obtient un R^2 de 0,72 grâce à l'ajout de ces nouveaux indicateurs. Ces résultats appuient et précisent les précédents concernant l'importance des pratiques culturales sur la qualité des sols. Ils montrent également l'intérêt de poursuivre une réflexion sur le développement d'indicateurs des pratiques culturales, sur le potentiel d'utilisation de BDD comme le SIGEC ou la BDD centralisé de REQUASUD, pour mieux comprendre et suivre l'influence des pratiques sur la qualité des sols agricoles wallons, et à terme permettre le développement de nouveaux outils d'aide à la décision.

2.1.4. Relations entre les indicateurs biologiques et les teneurs en carbone

Le corrélogramme des données, présenté en figure 5, reprend l'ensemble des résultats des conventions CARBIOSOL. Ainsi, nous pouvons constater que le carbone organique total est hautement et positivement corrélé au carbone des fractions fines et grossières, le carbone extrait à l'eau chaude et froide, ainsi qu'au carbone et à l'azote microbien. De plus le carbone microbien est hautement et positivement corrélé avec la respiration potentielle. On constate que l'azote extrait à l'eau froide n'est corrélé qu'avec le carbone extrait à l'eau chaude. De plus, le potentiel métabolique (*i.e.* la richesse microbienne fonctionnelle) et la minéralisation nette de l'azote ne sont corrélés avec aucun autre indicateur ; ces indicateurs ne sont donc pas redondants avec d'autres. Ce corrélogramme permet donc de choisir des indicateurs indépendants, afin d'obtenir un maximum d'informations différentes possibles, avec un minimum de mesures.

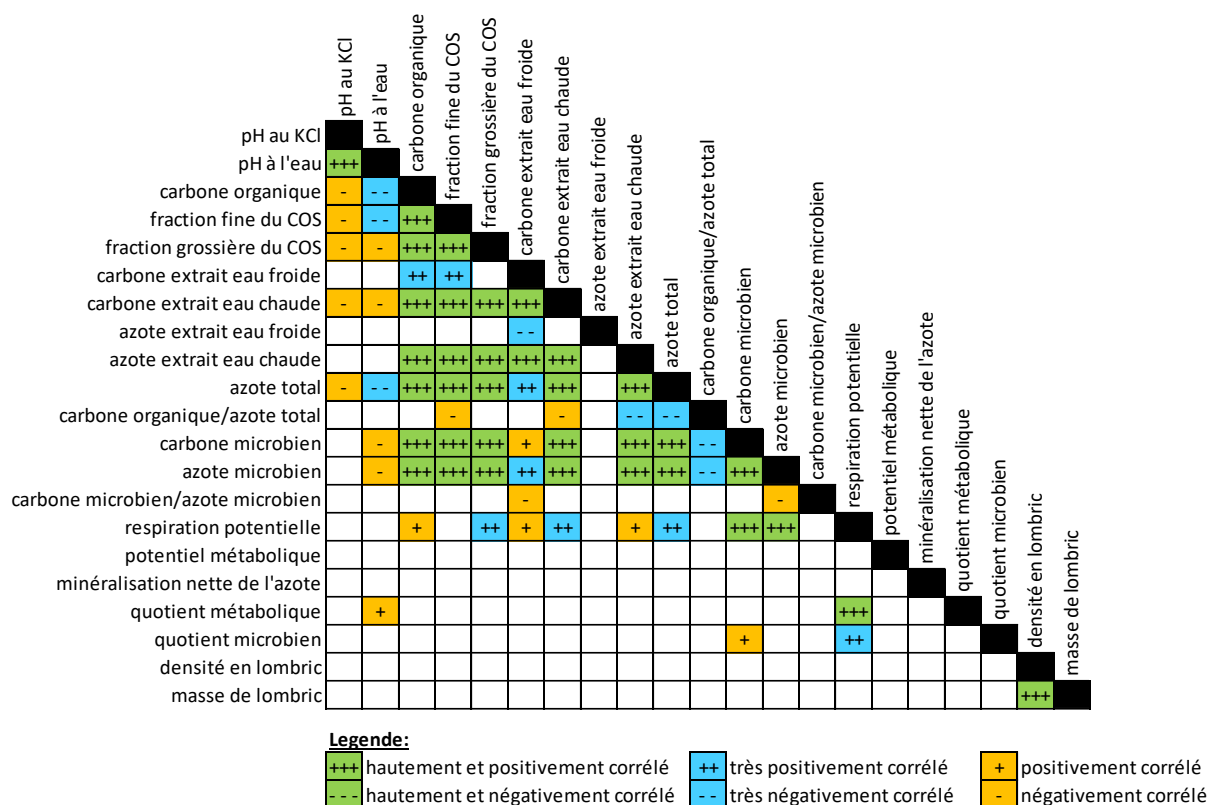


Figure 5 : Corrélogramme des indicateurs mesurés dans des sols cultivés de CARBIOSOL dont l'échantillonnage a eu lieu en 2013, 2014 (Carbiosol 1), 2015 (Carbiosol 2), 2016 (Carbiosol 3) et 2017 (Carbiosol 4). n minimal=120 et n maximal=366. Jaune : p<0,05 ; Bleu : p<0,01 ; Vert : p<0,001 ; Blanc - p>0.05. Test rho de Spearman.

2.1.5. Transfert des outils vers les acteurs

Dans l'objectif de mesurer les fractions de carbone par des méthodes moins coûteuses et non-destructrices, une analyse de faisabilité de mesure des fractions de carbone par SPIR (spectroscopie proche infra-rouge) a été réalisée. Cette méthode est déjà utilisée avec succès dans différents laboratoires provinciaux d'analyses de terres agricoles, pour par exemple l'évaluation du COT, de la CEC ou encore de la teneur en argiles des sols. Au total, 325 échantillons de sols (de cultures et de prairies) ont été fractionnés et analysés par SPIR au laboratoire provincial de Tinlot. La librairie spectrale ainsi obtenue a permis de tester la calibration de modèles permettant l'évaluation des teneurs en C<20µm et C>20µm des sols, en considérant leur somme comme égale à la teneur en COT (réf. Annexe 4). Le dernier modèle construit sur l'ensemble des points (cultures et prairies confondues) présente des résultats avec une RMSE de 2.66, un RPD de 1.72 pour le C<20µm et de 4.36 pour le C>20µm. Ainsi, **la mise en routine de la mesure des fractions de C organique par les laboratoires provinciaux apparaît possible dans un délai court, et ce pour un coût faible.** L'essentiel du matériel nécessaire pour le fractionnement en laboratoire y est bien souvent déjà disponible, et la manipulation reste simple et rapide. De plus, l'utilisation de la librairie spectrale initiée dans le

cadre de CARBIOSOL 5 et du protocole déjà mise en place dans les laboratoires provinciaux pour la mesure par SPIR du COT facilitent grandement cette mise en routine.

Afin de générer des cartes et de permettre leurs mises-à-jour, des scripts informatiques sous R ont été développés et adaptés aux données plus nombreuses de REQUASUD afin d'y appliquer la méthode de cartographie du COT développée dans CARBIOSOL 3 (Chartin *et al.*, 2016). **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 2017. 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. Ainsi, des **outils cartographiques et graphiques ont été développés et améliorés comme aide/outils de diagnostic de la qualité des sols** à l'échelle parcellaire ou régionale (Figure 6 ; Krüger *et al.*, 2018a). Ces outils se concentrent sur : le carbone stable des sols et leur déficit de saturation (évaluation à la parcelle et à la région), l'évolution du COT dans le temps par régions agricoles (sur base des données REQUASUD), et l'intégration des stocks de COT de Wallonie (sols agricoles et forestiers) dans un projet global 'GSOC map project'. Plusieurs de ces outils ont été mis à disposition de REQUASUD et du grand public (Geoportail², GSOC map³).

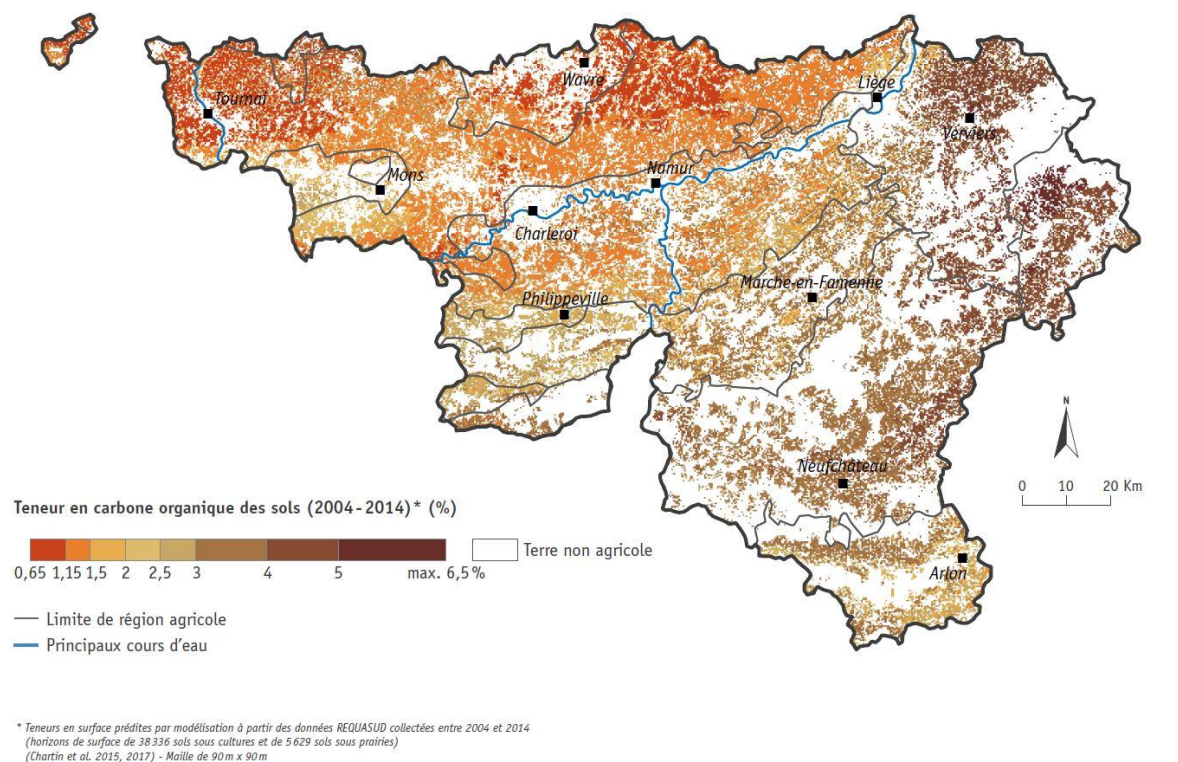


Figure 6: Teneurs en carbone organique des sols agricoles wallons.
(DGO3, 2017) – source : UCL-ELI-TECLIM ; REQUASUD (licence A09/2016).

² <http://geoportail.wallonie.be>

³ <http://www.fao.org/world-soil-day/global-soil-organic-carbon-map/en>

Lors d'une journée d'étude organisée avec Greenotec (plus de 130 personnes présentes), les échanges avec les agriculteurs ont souligné leur intérêt pour la recherche et le développement d'indicateurs pour évaluer la qualité biologique du sol en Wallonie. De plus, des discussions avec des spécialistes des pays limitrophes, ont montré que **les indicateurs biologiques sélectionnés dans le projet CARBIOSOL forment une base d'intérêt pour l'évaluation de la qualité biologique des sols**. Toutefois, **la mise en routine des indicateurs biologiques nécessite encore des travaux additionnels**, afin de mettre en place les mesures, garantir leur qualité, créer des outils d'analyses et de diffusion des résultats ainsi que leurs interprétations. Une introduction graduelle des indicateurs biologiques, en fonction des capacités des laboratoires d'analyses provinciaux, est à privilégier. La définition de gammes de référence présente une importante étape vers un outil d'évaluation.

Trois bases de données ont donc été créées et transférées vers les acteurs. Une base de données 'LIBRAIRIE SPECTRALE' contenant les mesures par SPIR (voir partie 3.1.2 de ce rapport), une base de données 'CARBIOSOL', figée, contenant toutes les données du projet (Carbiosol 1 à 4) (voir partie 2.2 de ce rapport) et une base de données 'REFERENTIEL', évolutive, contenant des données de la base 'CARBIOSOL' et mise en forme pour la base centralisatrice de Requasud (voir partie 3.1.1 de ce rapport).

Dans cet objectif d'implémentation progressive des indicateurs dans les laboratoires provinciaux, **une brochure sur les indicateurs de la qualité des sols agricoles wallons a été élaborée** (c.f. brochure, Annexe 1). La mise en forme et la dissémination seront réalisées par le Service Public de Wallonie. De plus, **une demi-journée de présentation** des résultats du projet CARBIOSOL, notamment des indicateurs et des outils dérivés, s'est déroulée le jeudi 17/01/2019 (Annexe 10). Un article dans un journal agricole (Le Sillon Belge) est en cours de soumission. Un prototype de bulletin d'analyse est également proposé dans ce rapport (Annexe 9).

2.2 Base de données intégrée « CARBIOSOL – indicateurs biologiques des sols agricoles wallons »

La base de données (BDD) « CARBIOSOL – indicateurs biologiques et carbone organique des sols agricoles wallons » comprend les valeurs des indicateurs biologiques et des fractions de carbone mesurées au cours des subventions CARBIOSOL 1 à 4. Cette BDD est constituée de 415 échantillons de sols (124 provenant de sols sous cultures et 66 de sols de prairies), prélevés sous deux occupations différentes (en 2013 et 2014), dans cinq régions agricoles (en 2015), pendant quatre périodes d'échantillonnage (en 2016), sous huit types de cultures (en 2017) et sous quatre types d'exploitations agricoles (en 2017). Les sols sous cultures appartiennent à des agriculteurs volontaires et les sols sous prairies proviennent du réseau de mesure BioEcoSys. Les données des parcelles expérimentales issues des essais à long terme de LongTours, Gentinnes et de Libramont du CRA-W n'ont pas été intégrées à cette BDD. Les résultats pour ces ELT ont été fournis au CRA-w et une partie est présentée dans la brochure).

N.B. À des fins de complémentarité pour des analyses statistiques et/ou spatiales, des données issues d'autres réseaux d'analyse des sols wallons (CARBOSOL, REQUASUD, IPRFW et AardeWerk) ont également été exploitées au cours de ces 4 précédentes subventions, et sont résumées dans les rapports de projet relatifs à ces subventions (voir références en fin de document). Ces données n'ont pas été incluses dans la BDD CARBIOSOL. De même, les données de stocks de COT n'ont pas été incluses dans la BDD CARBIOSOL.

2.2.1. Structuration de la BDD CARBIOSOL

La structure actuelle de la BDD est présentée en tableau 1. Il s'agit d'une BDD non-évolutive, c'est-à-dire qu'aucune nouvelle donnée n'y sera intégrée. La structure de la base de données a été discutée lors de réunions de concertation. Il a été décidé de fournir une BDD en français, sous format « .csv » lisible par le logiciel d'analyse statistique 'R'.

Tableau 1 : Structure de la base de données « CARBIOSOL ».

	Intitulé	Description et remarques	Type de données	Nombre de décimales	Unités	Tables associées	Champs obligatoires
SIGNALYTIQUE	ID_SUBVENTION	Identifiant de la subvention	Chaîne de caractères	varchar(11)			OUI
	ID_ECHANTILLON	Identifiant numérique unique de l'échantillon	Chaîne de caractères	int(3)			OUI
	NOM_ECHANTILLON	Nom de l'échantillon utilisé lors des campagnes d'échantillonnage	Chaîne de caractères	varchar(7)			OUI
	PERIODE_ECHANTILLON	Période d'échantillonnage	Ex : aout-16	varchar(7)		TABLE_PERIODE_ECHANTILLON	OUI
	ANNEE_ECHANTILLON	Année de l'échantillonnage	Numérique : AAAA	int(4)			OUI
	OCCUPATION	Occupation du sol au moment du prélèvement	Chaîne de caractères	varchar(7)		TABLE_OCCUPATION	OUI
	CULTURE_PRELEVEMENT	Culture au moment du prélèvement	Chaîne de caractères	varchar(14)		TABLE_CULTURE_PRELEVEMENT	NON

ANALYTIQUE	ID_SITE	Identifiant du site de prélèvement	Chaîne de caractères	varchar(3)			NON
	REGION_AGRICOLE	Régions agricoles wallonnes, définies selon leurs caractéristiques naturelles et de leur potentiel agro-économique ¹	Chaîne de caractères	varchar(16)		TABLE_ REGION_ AGRICOLE	OUI
	COORDONNEE_X	Longitude en projection lambert 72	Numérique	int(6)	0	m	NON
	COORDONNEE_Y	Latitude en projection lambert 72	Numérique	int(6)	0	m	NON
	REPETITION	Numéro de la répétition	Numérique	varchar(2)			NON
	EXPLOITATION	Type d'exploitation des cultures (mode de gestion)	Chaîne de caractères	varchar(21)		TABLE_ EXPLOITATION	OUI
	PRATIQUE_AGRICOLE	Type de pratique agricole (TCS, paille-CIPAN etc.)	Chaîne de caractères	varchar(12)		TABLE_ PRATIQUE_ AGRICOLE	NON
	ANNEE_CONVERSION	Année de conversion en agriculture biologique	Numérique : AAAA	varchar(4)	0	TABLE_ANNEE_ CONVERSION	NON
	PH_KCL	pH mesuré au KCl	Numérique	varchar(4)	2	/	NON
	PH_H2O	pH mesuré à l'eau	Numérique	varchar(4)	2	/	NON
	C_ORGA	carbone organique total du sol	Numérique	varchar(4)	2	gC/100g	NON
	C_ORGA_INF20	carbone dans la fraction inférieure à 20µm du sol	Numérique	varchar(4)	2	gC/100g	NON
	C_ORGA_SUP20	carbone dans la fraction supérieure à 20µm du sol	Numérique	varchar(4)	2	gC/100g	NON
	C_EAU_FROIDE	carbone extrait à l'eau froide	Numérique	varchar(5)	1	mg C.kg-1	NON
	C_EAU_CHAUDE	carbone extrait à l'eau chaude	Numérique	varchar(6)	1	mg C.kg-1	NON
	N_EAU_FROIDE	azote extrait à l'eau froide	Numérique	varchar(5)	1	mg N.kg-1	NON
	N_EAU_CHAUDE	azote extrait à l'eau chaude	Numérique	varchar(5)	1	mg N.kg-1	NON
	N_TOTAL	azote total du sol	Numérique	varchar(4)	2	‰	NON
	C_ORGA_N_TOTAL	ratio carbone organique/azote total	Numérique	varchar(4)	1	/	NON
	C_MIC	carbone dans la biomasse microbienne (carbone microbien, biomasse microbienne)	Numérique	varchar(4)	0	mg C.kg-1	NON
	N_MIC	azote dans la biomasse microbienne (azote microbien)	Numérique	varchar(3)	0	mg N.kg-1	NON
	C_MIC_N_MIC	ratio carbone microbien/azote microbien	Numérique	varchar(4)	1	/	NON
	P_RESPIRATION	potentiel de respiration du sol	Numérique	varchar(4)	2	mg C-CO2. kg-1.h-1	NON
	P_METABOLIQUE	potentiel métabolique microbien	Numérique	varchar(4)	1	%	NON
	N_MINERALISATION	minéralisation nette de l'azote	Numérique	varchar(5)	2	mg N.kg-1.j-1	NON
	Q_METABOLIQUE	quotient métabolique	Numérique	varchar(4)	2	mg C-CO2. kg-1 C. h-1	NON
	Q_MICROBIEN	quotient microbien	Numérique	varchar(5)	2	%	NON
	LOMBRIC_DENS	densité de lombrics	Numérique	varchar(3)	0	individus. m-2	NON
	LOMBRIC_MASS	masse de lombrics	Numérique	varchar(3)	0	g.m-2	NON

2.2.2. Accès à la BDD CARBIOSOL

La base de données est hébergée sur un serveur de l'Université de Liège. L'accès à cette base se réalise par le site internet www.carbiosol.uliege.be dont une capture d'écran est présentée ci-dessous.

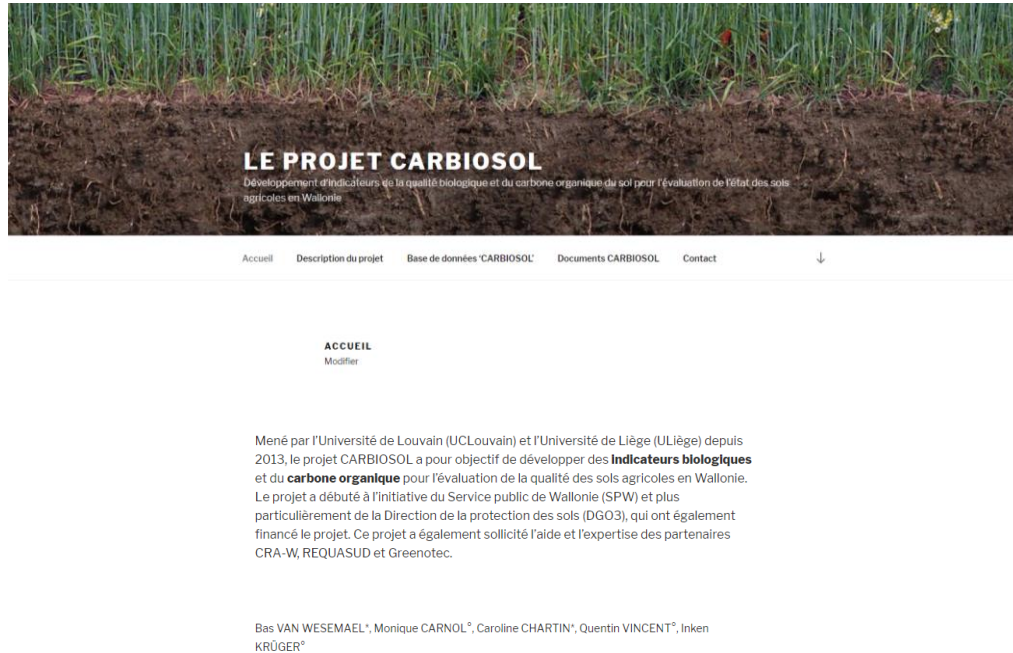


Figure 7 : Capture d'écran d'une partie de la page d'accueil du site www.carbiosol.uliege.be. Cette interface web permet le téléchargement sécurisé de la base de données.

La base de données et les documents associés (c'est-à-dire le canevas de métadonnées et le script R) sont placés dans la page « Base de données 'CARBIOSOL' ». Cette page est sécurisée par un mot de passe qui peut être demandé aux auteurs de ce rapport. Il est également possible d'envoyer automatiquement un mail à l'administrateur du site (Quentin Vincent) pour la demande du mot de passe dans l'onglet « Contact » du site.

Document technique associé à la BDD CARBIOSOL

Le document technique associé à la BDD CARBIOSOL est placé en annexe 2. Il s'agit d'un canevas présentant les métadonnées. Il est également téléchargeable sur le site www.carbiosol.uliege.be.

2.2.3. Analyse statistique intégrée de la BDD CARBIOSOL

Des scripts informatiques, adaptés à la structuration de la BDD CARBIOSOL, utilisables sur R ont été développés. Ainsi, un utilisateur ayant téléchargé la BDD CARBIOSOL, peut utiliser ces scripts afin de réaliser des analyses statistiques et graphiques adaptés à ses besoins. Pour cela, consulter le document « Scripts informatiques du logiciel R pour les sorties statistiques et graphiques de la base de données 'carbiosol' », développés par Quentin VINCENT et mis en annexe 5. Ce script est également téléchargeable sur le site www.carbiosol.uliege.be. Des exemples de sorties statistiques et graphiques sont présentées ci-dessous.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	levels.GROUPES.	N	MIN	Q1	MEDIAN	MOYENNE	Q3	MAX	ECART_TYPE	
2	ardenne	30	355,6642055	740,2791307	965,1846294	1084,81659	1351,09	2185,303771	512,8219774	
3	condroz	38	164,6409594	313,2360218	458,55	649,7642265	863,2836773	2046,901647	516,7300549	
4	famenne	6	1118,269827	1229,812326	1542,814609	1712,70347	1803,284649	3056,735547	716,2715869	
5	limoneuse	183	54	241,25	321,9	373,9532559	450,25	1876,23044	229,1070054	
6	sablo-limoneuse	70	165,7910089	284,5645473	481,4	461,6011023	594,55	882,4	181,5938432	

Teneur moyenne en carbone microbien des sols cultivés selon les régions agricoles

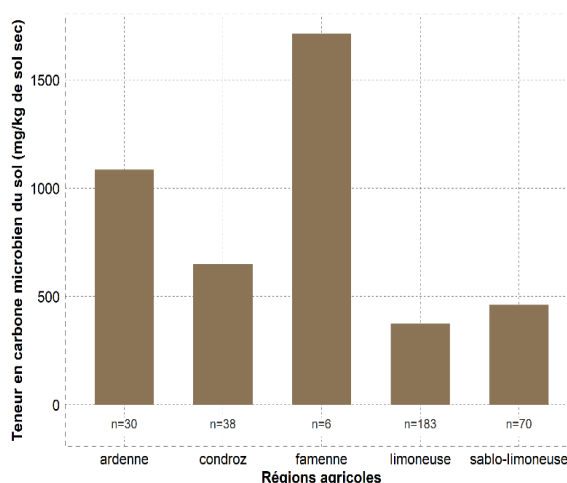


Figure 8 : Exemples de sorties statistiques et graphiques possibles de la BDD 'CARBIOSOL' à partir des scripts R du document en annexe 5.

2.3. Liste d'indicateurs de référence de la qualité biologique des sols en Wallonie et méthodes analytiques associées

La liste des indicateurs de références sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 2 : Indicateurs de référence de la qualité biologique de sols wallons et méthodes analytiques associées.

	Indicateur	Définition	Principe	Variabilité saisonnière
Indicateurs chimiques	Carbone organique total	L'ensemble du carbone organique présent dans le sol.	Analyses séparées du Carbone Total (CT) et du Carbone Inorganique (CI), puis soustraction du CI au CT afin d'obtenir le carbone organique total (COT).	aucune
	Fraction fine de carbone	Particules libres d'argiles et limons fins et des micro-agrégats - le carbone organique y est stable sous forme de complexes organo-minéraux (<20µm).	Un échantillon de sol est fractionné physiquement par tamisage humide à 20µm. La teneur en carbone organique de la fraction fine < 20µm est mesurée selon le même protocole que le COT.	aucune
	Fraction grossière de carbone	Mélange de micro agrégats, de petits macro agrégats et de matière organique particulaire (>20µm).	Un échantillon de sol est fractionné physiquement par tamisage humide à 20µm. La teneur en carbone organique de la fraction fine > 20µm est mesurée selon le même protocole que le COT.	aucune
Indicateurs biologiques	Carbone extrait à l'eau froide	Le carbone extrait à l'eau froide est le carbone disponible pour les micro-organismes.	Extraction d'un échantillon de sol avec de l'eau froide (20°C) et analyse du carbone organique total dans l'extrait..	octobre<avril=juin = août.
	Carbone extrait à l'eau chaude	Le carbone extrait à l'eau chaude présente une fraction active qui inclut le carbone microbien, mais n'est pas limité à celui-ci.	L'extraction consécutive à l'extraction à l'eau froide d'un échantillon de sol avec de l'eau chaude (80°C) permet la mesure de deux propriétés du sol liées au cycle de carbone.	Juin<avril< août=octobre
	Azote extrait à l'eau froide	Mesure permettant le calcul d'indice comme les rapports eau chaude/eau froide ou azote/carbone	Il s'agit d'une extraction d'un échantillon de sol avec de l'eau froide (20°C), suivi de l'analyse de l'azote total dans l'extrait..	juin=août< avril=octobre
	Azote extrait à l'eau chaude	Mesure de la quantité d'azote inorganique et organique (minéralisable) potentiellement disponible pour les plantes.	Il s'agit d'une extraction consécutive à l'extraction à l'eau froide d'un échantillon de sol avec de l'eau chaude (80°C).	juin<août< avril<octobre

Biomasse microbienne	La biomasse microbienne est la composante vivante de la matière organique à l'exclusion des macro-organismes et des racines.	Obtenu par fumigation au chloroforme. Le carbone microbien est calculé à partir de la différence entre le carbone organique extrait d'un sol fumigé et celui d'un sol non-fumigé.	aucun
Rapport Cmic/Nmic	Donne des informations sur la composition relative de la communauté microbienne en bactéries et en champignons	Rapport entre le carbone microbien et l'azote microbien.	octobre≤avril= juin≤août
Potentiel métabolique	Mesure de la diversité fonctionnelle de la communauté microbienne du sol. Elle mesure la capacité des bactéries du sol à dégrader différents substrats carbonés.	Un extrait de sol est incubé dans une plaque contenant des puits avec 31 substrats carbonés différents. Les puits deviennent mauve lorsque le substrat est décomposé.	avril≤août= octobre≤juin
Respiration potentielle	Mesure de la vitesse de la minéralisation du carbone organique en CO ₂ lors de la décomposition de la matière organique par les micro-organismes.	La respiration potentielle est mesurée comme production de CO ₂ d'un échantillon de sol frais dans une bouteille hermétiquement fermée dans des conditions définies.	octobre<avril< juin=août
Minéralisation nette de l'azote	Transformation de l'azote sous forme organique en azote minéral (NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻). Elle donne des informations sur la disponibilité de l'azote pour les plantes, indispensable à leur croissance.	Différence entre la quantité d'azote minéral (NH ₄ ⁺ et NO ₃ ⁻) avant et après une incubation de 28 jours à 25°C en absence de racines et de lessivage.	avril≤août= octobre≤juin
Densité des vers de terre	Nombre de vers de terre échantillonné par mètre carré.	Le contact avec une solution de moutarde cause des irritations aux vers de terre qui les font remonter à la surface du sol. Les vers de terre peuvent alors être échantillonnés de manière non-destructive pour le sol.	octobre ≤ avril= juin≤août
Quotient métabolique	Quotient éco-physiologique correspondant au rapport entre la respiration potentielle et le carbone microbien. Il représente la quantité de CO₂ respiré par unité de biomasse microbienne.	Calculé à partir des mesures du carbone microbien et de la respiration potentielle.	aucune
Quotient microbien	Quotient éco-physiologique correspondant au rapport entre le carbone microbien et le carbone organique total. Il donne des renseignements sur la disponibilité de substrat pour les micro-organismes.	Calculé à partir des mesures de carbone microbien et de carbone organique total.	aucune

Les méthodes analytiques complètes sont disponibles sous forme de fiches dans la brochure dédiée à la qualité biologique des sols agricoles wallons (Annexe 1).

3. Créer les bases de données et les outils dérivés du référentiel wallon pour l'analyse régionale et parcellaire de la qualité biologique des sols

3.1 Bases de données centralisatrices

3.1.1. Le 'REFERENTIEL wallon de la qualité biologique des sols agricoles'

La **base de données - « RÉFÉRENTIEL wallon de la qualité biologique des sols agricoles »** est une version simplifiée et mise en forme (selon les standards de REQUASUD) de la BDD 'CARBIOSOL'. Cette BDD 'REFERENTIEL' alimentera la BDD centralisatrice de REQUASUD. Ce premier jeu de données permettra à REQUASUD d'avoir des critères de validation pour les futures analyses potentielles réalisées par les laboratoires du réseau. Ces données ont été transmises à REQUASUD sous format SQL, compatible avec leur base de données existante. Pour plus de détails concernant la BDD REFERENTIEL, veuillez consulter le canevas de présentation des données en annexe 3. Un 'data-mapping' (un tableau permettant la correspondance des intitulés de la base de données 'CARBIOSOL', 'REFERENTIEL' et celle du data-paper soumis dans Ecology) est placé en annexe 8.

3.1.2. La 'librairie spectrale wallonne des teneurs en fractions de carbone des sols agricoles'

La « **LIBRAIRIE SPECTRALE** des fractions de COT » contient les spectres du proche infrarouge (obtenus via le laboratoire de Tinlot affilié au réseau REQUASUD) et les résultats d'analyses des fractions de COT de 350 échantillons de sols (obtenues à l'UCLouvain). Cette BDD est sous format « .xls ». Elle a été transmise à V. Genot qui l'a intégrée avec succès dans la librairie spectrale du laboratoire de Tinlot. Les méthodes pour la calibration des modèles d'estimation des fractions de COT ont été également transmises, et seront prochainement testées/validées sur d'autres spectres que ceux du projet CARBIOSOL. Les résultats d'estimation des fractions de COT via les analyses SPIR alimenteront dans le futur le RÉFÉRENTIEL. Pour plus de détails concernant la BDD REFERENTIEL, veuillez consulter le canevas de présentation des données en annexe 3.

3.2.2. Hébergement des bases de données centralisatrices : matrice SWOT

L'asbl REQUASUD étant l'utilisateur exclusif de ces deux BDD, il a été proposé aux responsables de REQUASUD de devenir les hébergeurs de ces deux BDD. Un accord a été passé entre les bénéficiaires de la subvention CARBIOSOL et les responsables de l'asbl REQUASUD suite à une réunion technique (03/07/2018).

Une matrice SWOT consacrée à l'hébergement de ces deux BDD a été développée en tenant compte des avis et commentaires des futurs hébergeurs, utilisateurs et actuels développeurs des BDD (Figure 9). De plus, un canevas de présentation des données accompagne les deux BDD

(annexes 3 et 4). Le canevas pour la « LIBRAIRIE SPECTRALE » précise également la méthode de calibration développée à l'UCLouvain.

	POSITIF	NEGATIF
INTERNE	- Savoir-faire en terme de: - gestion de BDD et de librairies spectrales; - conception d'outils annexes (<i>e.g. REQUACARTO...</i>); - analyses SPIR; - estimation de paramètres pédologiques sur base de SPIR. - BDD centralisée REQUASUD déjà structurée et opérationnelle - Outil de validation pour l'intégration de nouvelles données (<i>REQUAVALID</i>)	- Peu d'expérience du logiciel R - Manque de connaissance en géo/statistiques pour une mise à jour et interprétation optimale des cartes
EXTRENE	- Existence de la 'demande' concernant la mesure d'indicateurs biologiques (<i>agriculteurs</i>) - Alimentation 'en continu' des BDD via les laboratoires du réseau REQUASUD engagés dans la mesure des indicateurs - Données du projet CARBIOSOL pour la calibration/validation des nouvelles données/entrées dans le REFERENTIEL - Scripts issus du projet CARBIOSOL pour la cartographie, les sorties graphiques et tableaux (<i>mises à jour facilitées</i>)	- Laboratoires ne mettent pas OU ne peuvent pas mettre en routine les indicateurs OU utilisent d'autres méthodes - Biais potentiels dans les mesures entre laboratoires

Figure 9 : Matrice SWOT consacrée à l'hébergement par l'asbl REQUASUD des BDD 'RÉFÉRENTIEL' et 'LIBRAIRIE SPECTRALE', développées au cours de la subvention CARBIOSOL V.

3.2 Outils dérivés

3.2.1. Procédure de validation et de mise à jour des bases de données et des cartes en découlant

Comme il s'agit d'une base de données évolutive, une validation des données est nécessaire. En effet, cette dernière subit les procédures de validation lors de l'implémentation de nouvelles données. En amont, une réunion (08/01/19) avec REQUASUD a permis de fixer les règles de validation des données, conformes à leur canevas existant. Un livrable supplémentaire (non demandé dans la subvention), développé par Quentin VINCENT, a été fourni à REQUASUD stipulant les limites de validation du REFERENTIEL. Ce fichier SQL a été délivré le 21/01/19 par courrier électronique.

Une réunion entre les membres bénéficiaires de la subvention CARBIOSOL 5, les responsables de REQUASUD et de la cellule SIG du SPW a eu lieu le 13/09/18. L'articulation du

transfert de données cartographiques entre REQUASUD et le SPW a été abordée, et donc la mise en place d’une procédure de validation et de mise à jour des outils cartographiques développées lors de CARBIOSOL, *i.e.* les cartes de COT.

Les données utilisées pour produire les cartes de COT alimentant le geoportail sont issues de la BDD centralisée de REQUASUD. Les procédures de validation et de mises à jour de ces données suivent donc les procédures rigoureuses utilisées par REQUASUD. Lorsque la cellule SIG du SPW jugera nécessaire d’effectuer une mise à jour des cartes de COT pour les sols agricoles, elle devra en informer les responsables de REQUASUD. Une convention pourra à l’occasion être signée. Les demandeurs devront préciser la période sur laquelle l’analyse spatiale doit être effectuée. Dès lors, la personne chargée de l’analyse chez REQUASUD pourra lancer la procédure. Celle-ci est détaillée dans un document support (réf.) et fait appel à des scripts informatiques R développés par Caroline CHARTIN (UCLouvain) et adaptés spécifiquement à cette tâche grâce à l’aide de Julien TUYLS (REQUASUD). Lorsque les cartes auront été validées et produites par la procédure scriptée, elles seront fournies dans le format requis à la cellule SIG du SPW ainsi que les informations nécessaires à la mise à jour des fiches de metadonnées associées (METAWAL). Pour toute précision, veuillez consulter l’annexe 6.

3.2. Méthode d’estimation de la durabilité de la production de la biomasse au sens de la protection de la matière organique des sols et de la réduction des émissions de CO₂

3.2.1. Prise en compte, dans les calculs d’émission de GES, des changements de stocks de carbone du sol dû à l’utilisation de biomasse pour la production d’électricité.

L’annexe 3 à l’arrêté du Gouvernement wallon du 30 novembre 2006 traite de la promotion de l’électricité produite au moyen de sources d’énergie renouvelables ou de cogénération. Cette annexe définit les règles pour le calcul de l’impact sur les gaz à effet de serre (E) des bioliquides et des combustibles fossiles de référence. Le calcul ne tient compte que de deux facteurs en ce qui concerne les stocks de carbone dans les sols, *i.e.* el et esca.

Il s’agit d’une approche qui mérite d’être approfondie en discussion avec le CWAPE et l’AWAQ. Dans les calculs nous avons fait l’hypothèse que la biomasse a été brûlée (donc pas de retour de digestat au sol) et que les résidus de cultures principales ont été utilisés (donc pas de bio-méthanisation). Evidemment, ces scénarios peuvent être pris en compte.

$$E = eec + el + ep + etd + eu - esca - eccs - eCCR - eee,$$

sachant que :

E	= total des émissions résultant de l'utilisation du carburant,
eec	= émissions résultant de l'extraction ou de la culture des matières premières,
el	= émissions annualisées résultant de modifications des stocks de carbone dues à des changements dans l'affectation des sols,
ep	= émissions résultant de la transformation,
etd	= émissions résultant du transport et de la distribution,
eu	= émissions résultant du carburant à l'usage,
esca	= réductions d'émissions dues à l'accumulation du carbone dans les sols grâce à une meilleure gestion agricole,
eccs	= réductions d'émissions dues au piégeage et au stockage géologique du carbone,
eCCR	= réductions d'émissions dues au piégeage et à la substitution du carbone, et
eee	= réductions d'émissions dues à la production excédentaire d'électricité dans le cadre de la cogénération.

Les émissions annuelles résultant de modifications des stocks de carbone dues à des changements dans l'affectation des sols (el : $g\ CO_2\ MJ^{-1}\ an^{-1}$) peuvent être calculées à l'aide de l'équation 1.

$$el = (CSR - CSA) * 3.664 * 1/20 * 1/P - eB \quad (1)$$

où

CSR: stock de carbone ($Mg\ ha^{-1}$) dans le sol et la végétation de l'affectation de référence (2008)

CSA: stock de carbone ($Mg\ ha^{-1}$) dans le sol et la végétation de l'affectation réelle au bout de vingt ans

P: productivité de cultures ($MJ\ ha^{-1}$)

eB: bonus de 29 $gCO_2\ MJ^{-1}$ pour biomasse produit terres dégradées restaurées.

Les stocks de carbone dans le sol ont été calculés par Chartin et al., (2017) pour les cultures et les prairies de chaque région agricole et pour les forêts dans le rapport Carbiosol 4 (page 71) (Tableau 3.1). Les stocks de carbone de la végétation ont été estimés uniquement pour les forêts (Tableau 3.2; Walle *et al.*, 2005; Lettens *et al.*, 2008). La productivité (P) des cultures a été estimée par Valbiom (Martin et Somer, 2016) (Tableau 3.3). Pour chaque culture de biomasse, l'affectation de sol à considérer pour estimer les stocks de carbone dans les Tableaux 3.1 et 3.2 est également donnée.

Tableau 3.1 Stocks de carbone des sols par affectation de terre et région agricole en $mg\ C.ha^{-1}$ pour la couche de 0 à 30 cm

	Prairie ¹	Culture ¹	Forêt ²
Sablo limoneuse	86.4	53.5	98.6
Limoneuse	90.5	54.5	101.3
Campine hennuyère	94	53.1	81.3
Condroz	87.1	60.7	101
Herbagière de Liège	103.4	83.6	121.8
Herbagière Fagnes	103.9	69.5	108.4

Fammenne	94.9	71.7	103.1
Ardenne	86.7	88.1	119.9
Jurassique	79.1	67.4	90
Haute Ardenne	91.5	107	129.9

¹ Chartin *et al.* (2017); ² Rapport Carbiosol 4, page 71

Tableau 3.2 Stock de carbone de la végétation des forêts en en Mg C ha⁻¹.

	Letkens <i>et al</i> (2008)	Van de Walle <i>et al</i> (2005)
Feuillu	100	102.3
Conifère	104	99.1
Mixte	88	-

Tableau 3.3 Productivité des cultures.

	Affectation ¹	PCI (MWh/t)	PCI (MJ/t) ²	Rendement (t/ha)	PCI (Mj/ha)
Miscanthus	prairie	4.1	14760	15	221400
Panic érigé	prairie	4.1	14760	15	221400
Anas de lin	culture	4.5	1620	7	113400
Paille de froment	culture	4.1	14760	3.3	48873
Paille de colza	culture	4.2	15120	3.9	58460
Taillis à courte rotation	forêt	3.9	14040	10	140400

¹ Affectation à considérer dans les calculs ; ² Valbiom 2018 ; 1 KWh = 3.6 MJ

Deux exemples pour illustrer comment calculer 'e'.

- Taillis à courte rotation installé sur une culture dans les Ardennes entraîne un changement d'affectation de sol de culture en forêt. Les chiffres en vert des tableaux sont utilisés et donnent un 'e' de -41.5g CO₂ MJ⁻¹.

Miscanthus sur culture dans la Région limoneuse à faible teneur en MO (càd avec un bonus 'eB') entraîne un changement d'affectation de sol de culture en prairie. Les chiffres en **rouge** sont utilisés et donnent un 'e' de -58.8 g CO₂ MJ⁻¹.

Les réductions d'émissions dues à l'accumulation du carbone dans les sols grâce à une meilleure gestion agricole (*esca*: g CO₂ MJ⁻¹ an⁻¹) peuvent être calculées à l'aide de l'équation 2.

$$esca = (\text{Effet gestion}) * 3.664 * 1/P \quad (2)$$

L'effet de gestion a été estimé par Pellerin *et al.*, (2017) (Tableau 3.4).

Tableau 3.4 Effet de la gestion sur le stockage de carbone dans les sols (Pellerin *et al.*, 2017)

	Affectation	Effet de gestion (kgCO ₂ ha ⁻¹ an ⁻¹)	Effet de gestion (kgCha ⁻¹ an ⁻¹)
Labour occasionnel	culture	389	106
CIPAN culture	culture	252	69
CIPAN prairie	culture	718	196
Bande enherbée	culture	1200	328
Agroforesterie	culture	3717	1014
Haies	culture	702	192
Incorporation de paille ¹	culture	-	178
Longueur de pâture	prairie	50	14
Extension de période de prairie temporaire	prairie	612	167
Extensification	prairie	52	14
Amélioration de prairies peu productives	prairie	940	257

¹Simulations de Liroux avec et sans paille (Demeter tool): delta C%: 0.07-0.1 sur 20 ans: 125-178 kg C ha⁻¹ an⁻¹

Deux exemples pour illustrer comment calculer 'esca' :

Paille de colza sous labour occasionnel. Les chiffres en [bleu](#) des tableaux sont utilisés et donnent un 'esca' de -6,7 g CO₂ MJ⁻¹.

Paille de froment en agroforesterie. Les chiffres en [orange](#) des tableaux sont utilisés et donnent un 'esca' de -76,1 g CO₂ MJ⁻¹.

3.2.2 Durabilité de la production de la biomasse au sens de la protection de la matière organique des sols.

L'utilisation de biomasse à des fins énergétiques implique qu'il y a une réduction de la biomasse retournée au sol. Ce qui pourrait avoir des conséquences sur la stabilité des agrégats et les risques d'érosion et de compaction (Van-Camp *et al.*, 2004). La stabilité des agrégats a été mesurée pour 85 échantillons de sols sous cultures en région limoneuse. Le diamètre moyen pondéré par masse (mean weight diameter ; MWD) a été déterminé selon la procédure d'humectation rapide (ISO/FDIS 10930). La concentration de carbone organique a été analysée par combustion sèche sur les mêmes échantillons.

Pour les sols de culture avec une concentration de COT en dessous 1.3 % le MWD est constant à une valeur très faible (Figure 10). Pour les sols avec une valeur de COT au-dessus de 1.3 %, la stabilité des agrégats augmente progressivement pour des sols contenant au moins jusqu'à 4 % de COT. Ce seuil de stabilité de 1.3% est très proche de la valeur de 1.15 % de COT considérée comme valeur critique de stabilité dans le rapport de l'état de l'environnement wallon (DGO3, 2017).

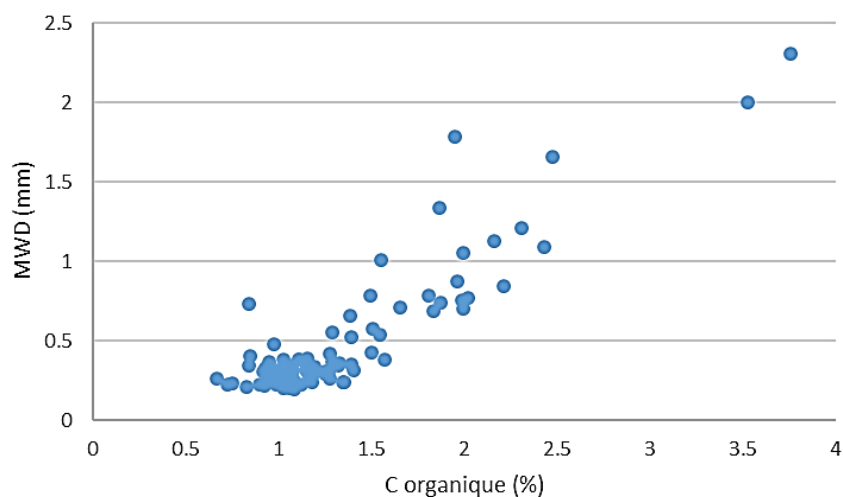


Figure 10 : Stabilité des agrégats (MWD) en fonction du COT pour les sols sous culture en région limoneuse.

La gestion agricole agit sur l'évolution du COT et pourrait contribuer à augmenter la stabilité des agrégats une fois que le seuil de 1.3 % de COT est dépassé. Le Demeter tool permet de simuler les effets de gestion agricole à long terme. Ainsi cet outil a été utilisé pour simuler deux types de gestion étudié sur les essais à long terme de Liroux (CRA-W), où les sols ont une teneur en COT inférieure au seuil de 1.3 %. La Figure 11 montre que l'enlèvement des pailles (par exemple pour la génération d'électricité) ne permet pas de restaurer le COT au-dessus de la limite de 1.3%. Par contre, pour la rotation qui inclut la restitution des pailles et une CIPAN, l'enfouissement de pailles fait croître le COT pour presque atteindre la limite de 1.3 % (Figure 12).

Figure 11 : Evolution de COT sur les essais de Liroux sans restitution des résidus de culture



Samen naar een duurzaam bodembeheer



Opvolging van de organische koolstofevolutie en advies voor duurzaam bodembeheer

Algemene gegevens

Datum: 11/01/2019

Naam landbouwer	biomass
Adres landbouwer	Vlaanderen
Perceelsnaam	RR6 (textuur = Leem)

Organische koolstofevolutie in de bodem

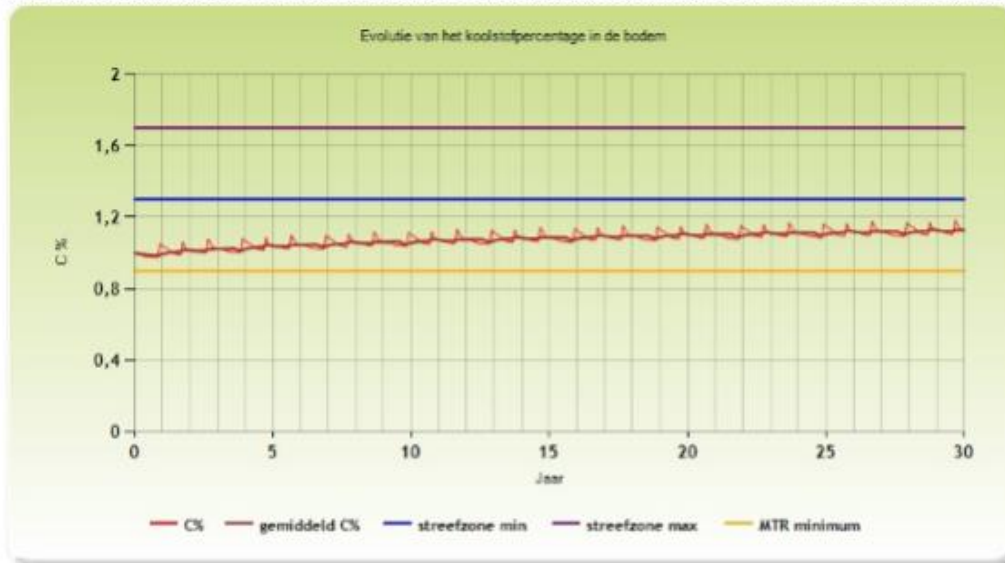
Initieel koolstofgehalte in de bodem (% C) 1

Diepte staalname 27 cm

Rotatie:

	Teelten en groenbedekkers	Toedieningen organisch materiaal
Jaar 1 (2019)	suikerbieten geoogst in oktober , oogstresten ingewerkt	
Jaar 2 (2020)	tarwe, wintertarwe geoogst in augustus , oogstresten afgevoerd	
Jaar 3 (2021)	gerst, wintergerst geoogst in juli , oogstresten afgevoerd	

Verwachte organische koolstofevolutie in de bodem bij de geselecteerde rotatie over 30 jaar:



Streefzones UGent

Figure 12 : Evolution de COT sur les essais de Liroux avec CIPAN et resitution des résidus de culture.



Samen naar een duurzaam bodembeheer



Opvolging van de organische koolstofevolutie en advies voor duurzaam bodembeheer

Algemene gegevens

Datum: 11/01/2019

Naam landbouwer	biomass
Adres landbouwer	Vlaanderen
Perceelsnaam	RR6 (textuur = Leem)

Organische koolstofevolutie in de bodem

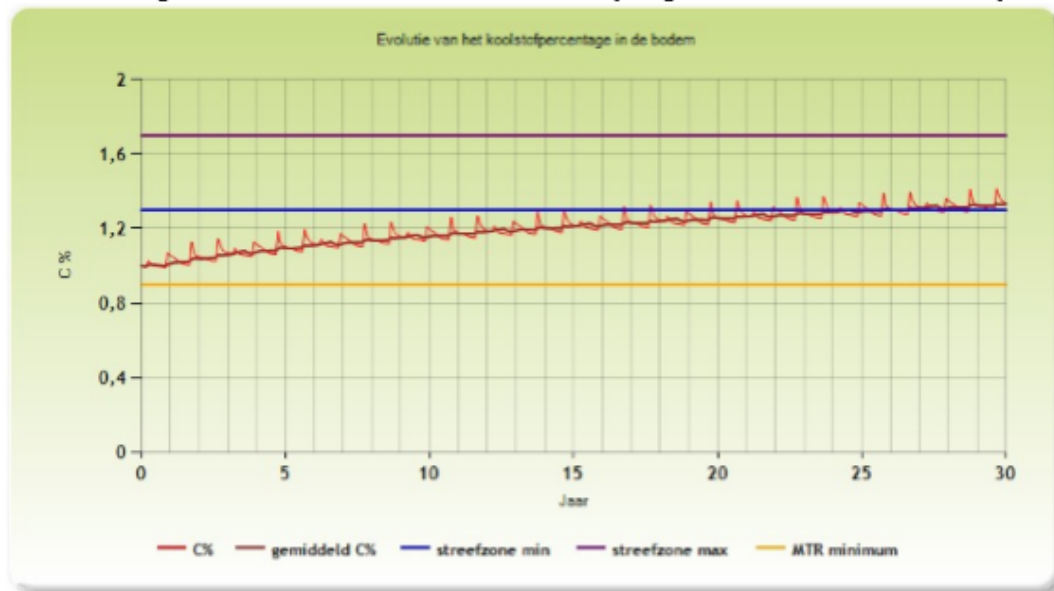
Initieel koolstofgehalte in de bodem (% C) 1

Diepte staalname 27 cm

Rotatie:

	Teelten en groenbedekkers	Toedieningen organisch materiaal
Jaar 1 (2019)	wikken ingewerkt in februari suikerbieten geoogst in oktober , oogstresten ingewerkt	
Jaar 2 (2020)	tarwe, winter tarwe geoogst in augustus , oogstresten ingewerkt	
Jaar 3 (2021)	gerst, wintergerst geoogst in juli , oogstresten ingewerkt	

Verwachte organische koolstofevolutie in de bodem bij de geselecteerde rotatie over 30 jaar:



Streefzones UGent

4. Mise à disposition de l'outil vers les laboratoires provinciaux wallons en vue de la délivrance d'un premier prototype de bulletins analytiques sur la qualité biologique des sols

Pour CARBIOSOL 5, la mise en routine des indicateurs fut discutée avec le personnel du laboratoire de Tinlot en particulier. De manière plus générale, des représentants scientifiques de CARBIOSOL ont également présenté le 11/09/2018 les indicateurs ainsi que les travaux de CARBIOSOL 5 aux responsables des laboratoires provinciaux du réseau REQUASUD.

Il est important de noter qu'il est ressorti de ces différents échanges, que :

- Tous les laboratoires ne sont pas prêts à intégrer les indicateurs proposés dans CARBIOSOL. Même si la demande existe, certains laboratoires ont d'abord besoin d'optimiser la mesure des indicateurs classiques (via la SPIR notamment);
- Les laboratoires provinciaux sont fort sollicités et effectuent déjà de nombreuses analyses. Leur emploi du temps étant vite saturé, il est difficile pour eux de dégager du temps pour travailler à la mise en routine de nouveaux indicateurs ;
- Tous les laboratoires ne sont pas égaux en terme de moyens, avec parfois un manque de personnel.

4.1 Les indicateurs biologiques

Une visite du laboratoire de Tinlot s'est déroulée le 14 juin 2018. Cécile Collin a présenté les principales analyses et équipements à Monique Carnol et Quentin Vincent. Après avoir pris connaissance des étapes d'une demande d'analyse en routine, une discussion autour des indicateurs biologiques a eu lieu. En effet, le temps d'analyse de certains indicateurs biologiques ne semble pas être compatible avec les chaînes d'analyses réalisées actuellement car les agriculteurs souhaitent obtenir leurs résultats sous les quelques jours après l'échantillonnage. Il est donc apparu qu'un « pack d'analyses biologiques » pourrait être proposé aux agriculteurs en spécifiant la durée d'analyse plus longue que les analyses classiques. Une version anonymisée de leur bulletin d'analyse a été fournie et servira de modèle pour le prototype de bulletin analytique à délivrer dans ce projet.

Prototype de bulletin analytique : Un prototype de bulletin analytique des indicateurs biologiques a été réalisé sur base des bulletins analytiques fournis par le laboratoire de Tinlot. Ce prototype de bulletin d'analyse est présenté en annexe 9.

Suite à la présentation du projet aux responsables des laboratoires du réseau REQUASUD début 2019, une visite du laboratoire d'écologie végétale et microbienne a été organisée pour Mme J. Roulet (Office Provincial Agricole) le 05/02/2019. Monique Carnol a présenté les différents outils analytiques du laboratoire. Une réunion s'en est suivie, portant sur les différents aspects pratiques de l'intégration d'analyses d'indicateurs biologiques dans les analyses des laboratoires provinciaux et des pistes de coopération ultérieure.

4.2 Les fractions de carbone organique

Le 13/03/2018, deux techniciens du laboratoire de Tinlot ont visité le laboratoire de l'UCLouvain où les fractionnements de COT sont effectués. Le matériel a été passé en revue et la manipulation a été effectuée par deux fois. Une stagiaire du laboratoire de Tinlot (TFE) était présente lors de cette visite et a participé aux manipulations. Des échantillons ont été échangés entre laboratoires et des mesures ont été faites par la stagiaire dans le laboratoire de Tinlot.

Les résultats de l'essai inter-laboratoire sont peu concluants. La manipulation doit être mieux adaptée au laboratoire de Tinlot et à son fonctionnement (matériel, réduction de la distance entre lieu de manip et étuve etc.). Depuis lors, l'adaptation de la méthode est restée en suspens, le personnel du laboratoire étant fort occupé par leurs occupations premières. Par ailleurs, l'utilisation des données SPIR pour la mesure des fractions est toujours étudiée afin d'être optimisée. À l'heure actuelle (le 14/12/2018), aucune tentative d'intégration des fractions dans un bulletin d'analyse classique n'a été effectuée, faute de manque de temps et de moyens.

5. Communiquer et vulgariser les résultats

5.1 Communications scientifiques

Conférences

Présentations orales :

- Bas van Wesemael, Caroline Chartin, Martin Wiesmeier, Margit von Lützwow, Eleanor Hobley, Monique Carnol, Inken Krüger, Morgane Campion, Ingrid Kögel Knabner. *An indicator for managing organic matter in soils*. BONARES Conference, 26-28 feb. 2018, Berlin, Germany.
- Caroline Chartin, Fabio Castaldi, Inken Krüger, Monique Carnol, Bas van Wesemael. *Estimating the potential of organic carbon sequestration in agricultural soils of Southern Belgium (Wallonia)*. EGU General Assembly, 8-13 Ap. 2018, Vienna, Austria.
- Bas van Wesemael, Caroline Chartin, Fabio Castaldi, Martin Wiesmeier, Inken Krüger, Monique Carnol, Ingrid Kögel Knabner, Valérie Genot. *Routine soil fertility analysis to improve soil organic matter management. A case study from southern Belgium*. The International Symposium on Soil Organic Matter Management in Agriculture, 29-30 may 2018, Braunschweig, Germany.
- Caroline Chartin, Fabio Castladi, Inken Krüger, Monique Carnol, Bas van Wesemael. *Estimation du potentiel de séquestration en Carbone Organique stable des sols agricoles – cas de la Wallonie (Belgique)*. Journées d'Etude des Sols, 9-12 Jul. 2018, Rouen, France.

Posters :

- Caroline Chartin, Inken Krüger, Monique Carnol, Bas van Wesemael. *Développement d'indicateurs de la qualité biologique des sols agricoles en Wallonie – le projet CARBIOSOL*. Journées d'Etude des Sols, 9-12 Jul. 2018, Rouen, France.

Publications

- Inken Krüger, Caroline Chartin, Bas van Wesemael, Monique Carnol, 2018. *Defining a reference system for biological indicators of agricultural soil quality in Wallonia, Belgium*. Ecological Indicators 95, 568-578.
- Bas van Wesemael, Caroline Chartin, Martin Wiesmeier, Margit von Lützw, Eleanor Hobley, Monique Carnol, Inken Krüger, Morgane Campion, Christian Roisin, Sylvain Hennart, Ingrid Knöbel Knabner, 2019. *An indicator for organic matter management in temperate agricultural soils*. Agriculture, Ecosystems & Environment.
- Quentin Vincent, Caroline Chartin, Inken Krüger, Bas van Wesemael, Monique Carnol, 2019. *CARBIOSOL: Biological indicators of soil quality and organic carbon in grasslands and croplands in Wallonia, Belgium*. Ecology (soumis le 22 février 2019).*
- Quentin Vincent, Inken Krüger, Caroline Chartin, Bas van Wesemael and Monique Carnol. *Water extractable C and N measurements as indicators of soil quality in Wallonia (Belgium)*. En préparation.

*L'article Vincent *et al.*, (soumis le 22 février 2019) est un data-paper, c'est-à-dire un article scientifique international à comité de lecture d'une base de données. La base de données publiée ici est la base CARBIOSOL en anglais. Le résumé du data-paper est présenté en annexe 7. La correspondance française des intitulés anglais de la base de données est placée en annexe 8.

5.2 Communication transversale avec les projets de recherche/vulgarisation en lien avec la qualité du sol

Etat de l'Environnement Wallon : Les équipes de l'UCLouvain et l'ULiège ont participé respectivement à l'élaboration des parties 'SOLS 2 – Matière organique dans les sols agricoles' (p.149) et 'SOLS FOCUS 3 Qualité biologique des sols' (p. 154) du rapport sur l'Etat de l'Environnement Wallon 2017 (DGO3, 2017).

• **Workshop de la DGO3 sur les sols**

Le Groupe de Travail Sol relevant du Comité de Gestion des Sols de la DGO3 souhaite aboutir à la création de données et géodonnées de référence uniques pour certaines caractéristiques et propriétés fondamentales des sols. Ainsi, un workshop, nommé « auberge espagnole sols », s'est tenu durant la journée du 29 octobre 2018 à Jambes. Au cours de cette journée, rassemblant des universitaires et des acteurs des sols (administrations, laboratoires *etc.*), Caroline CHARTIN a présenté une « success story » par rapport aux cartes du carbone organique et a également contribué à la partie « Comment améliorer la production des données liées au carbone organique et aux paramètres biologiques ? » en traitant le carbone organique. Quentin VINCENT a également participé à cette partie du workshop en présentant les paramètres biologiques.

5.3 Vulgarisation

- **Présentation auprès des représentants des laboratoires provinciaux**

Une présentation du projet CARBIOSOL et des outils issus du projet (propositions d'indicateurs, gammes de valeurs et interprétations *etc.*) aux représentants des laboratoires provinciaux du réseau REQUASUD s'est déroulée le 11/09/2018 à Gembloux. Cette présentation a eu pour but de promouvoir la mise en routine des indicateurs sélectionnés dans le projet au sein des laboratoires provinciaux de REQUASUD.

- **Brochure sur la qualité biologique des sols agricoles wallons**

La communication de l'ensemble des résultats et méthodes développées dans le projet CARBIOSOL (1 à 4) s'est effectuée grâce à l'élaboration d'une brochure officielle éditée par le SPW. Cette brochure vise à informer et à sensibiliser le public de l'importance du maintien et de l'amélioration de la qualité biologique du sol (notamment via les fonctions et les services écosystémique). Les résultats des projets CARBIOSOL 1 à 4 ont été synthétisés dans la brochure comme base d'un premier référentiel de la qualité biologique des sols en Wallonie. De plus, quelques exemples d'essais à long terme gérés par le CRA-W sont présentés dans ce document. La brochure met en avant l'influence des types d'exploitation et des pratiques agricoles sur la qualité biologique des sols. La valeur complémentaire des différents indicateurs biologiques en combinaison avec les indicateurs physico-chimiques est également soulignée. La brochure ayant pour cible principale les laboratoires d'analyses et les conseillers agricoles est présentée en annexe 1.

- **Demi-journée de restitution des résultats du projet CARBIOSOL**

Une demi-journée de présentation des résultats du projet CARBIOSOL (notamment les indicateurs et les outils dérivés), s'est déroulée le jeudi 17/01/2019. Cette journée fut organisée par les bénéficiaires et partenaires du projet. Le programme est consultable en annexe 10. Trente et une personnes (hors bénéficiaires) ont participé à la demi-journée. Des agriculteurs, conseillers agricoles et représentants de laboratoires (Figure 13) étaient présents permettant ainsi d'ouvrir une discussion quant à l'intérêt pour les agriculteurs, l'offre et la demande pour la mesure des indicateurs proposés.

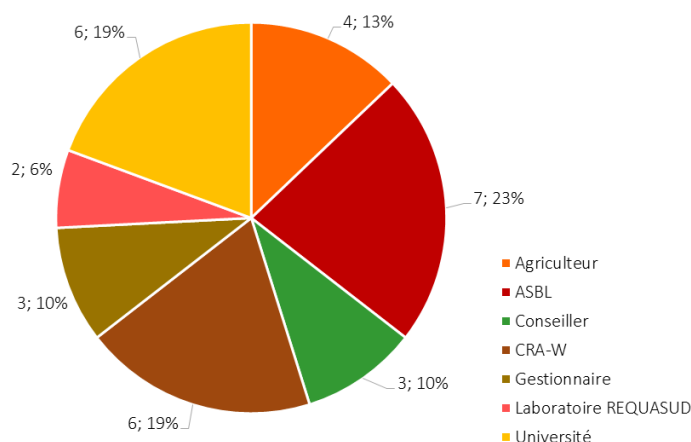


Figure 13 : Affiliations des 31 participants (hors organisateurs du projet) à la demi-journée CARBIOSOL du 17/01/2019

- **Article dans un journal agricole**

Un article de vulgarisation pour la presse agricole a été rédigé et proposé au journal « Le Sillon Belge ».

6. Liste des livrables

La liste des livrables ainsi que les destinataires et le format de ces livrables sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Liste des livrables, des destinataires et du format des documents.

Délivrables	Destinataire	Format
Brochure « La qualité biologique des sols agricoles en Wallonie »	SPW (délivré le 12/02/2019)	
Scripts informatiques du logiciel R pour les sorties statistiques et graphiques	SPW	Rapport final (annexe 5)
Scripts informatiques du logiciel R pour les sorties et mises à jours cartographiques	SPW et REQUASUD	Rapport final (annexe 6)
Canevas de présentation des données « CARBIOSOL : Indicateurs biologiques et carbone organique des sols agricoles wallons »	SPW	Rapport final (annexe 2)

Canevas de présentation des données « Référentiel wallon de la qualité biologique des sols agricoles »	REQUASUD (délivré le 14/03/2019)	Courrier électronique et rapport final (annexe 3)
Canevas de présentation des données « Librairie spectrale wallonne des teneurs en fractions de carbone des sols »	REQUASUD (délivré le 24/04/2018)	Courrier électronique et rapport final (annexe 4)
Matrice SWOT	REQUASUD (délivré le 03/09/18)	Courrier électronique, rapport intermédiaire et rapport final (partie 3.2.2.)
Base de données « CARBIOSOL : Indicateurs biologiques et carbone organique des sols agricoles wallons ».	SPW (accès délivré avec ce rapport final)	SQL. Stocké sur un serveur de l'ULiège. Disponible sur www.carbiosol.uliege.be
Base de données « REFERENTIEL wallon de la qualité biologique des sols agricoles ».	REQUASUD (délivré le 14/03/2019)	SQL et « .csv ». Envoyé par courrier électronique.
Délivable supplémentaire (non demandé dans la convention) : « Limites de validation du REFERENTIEL ».	REQUASUD (délivré le 21/01/19)	SQL. Envoyé par courrier électronique.
Base de données « LIBRARIE SPECTRALE wallon des teneurs en fractions de carbone des sols »	REQUASUD (délivré en 03/2019)	Excel. Envoyé par courrier électronique.
Prototype de bulletin d'analyse	REQUASUD	Rapport final (annexe 9)
Article dans un journal agricole	Le Sillon Belge (en soumission)	
Article dans un journal scientifique	Ecological Indicators	Format article scientifique ; sous review. Résumé du data-paper en annexe 7.
	Agriculture, Ecosystems & Environment	
	Ecology (soumis le 22/02/2019)	
Données des essais à long terme du CRA-w	CRA (délivré le 14/03/2014)	Excel. Envoyé par courrier électronique.
Résumé du projet CARBIOSOL 5 en anglais	SPW	Dernière page du rapport final (p.205)

Références

- Abbott, L.K., Murphy, D. V., 2003. Soil biological fertility: a key to sustainable land use in agriculture. Soil Biol. Fertil. a key to Sustain. L. use Agric.
- Acton, D.F., Gregorich, L.J., 1995. Health of our soils. Centre for Land and Biological Resources Research.
- Allen, S., Grimshaw, H.M., Parkinson, J., Allen, E., 1989. Chemical analysis of ecological materials.
- Anderson, J., Domsch, K., 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. Soil Biol. Biochem.
- 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, 251–255.
- Anderson, T.-H., Domsch, K.H., 1989. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. Soil Biol. Biochem. 21, 471–479.
- Anderson, T.-H., Domsch, K.H., 1985. Determination of ecophysiological maintenance carbon requirements of soil microorganisms in a dormant state. Biol. Fertil. Soils 1, 81–89.
- Baudron, F., Giller, K., 2014. Agriculture and nature: Trouble and strife? Biol. Conserv.
- Bending, G.D., Turner, M.K., Rayns, F., Marx, M.-C., Wood, M., 2004. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. Soil Biol. Biochem. 36, 1785–1792.
- Bispo, A., Cluzeau, D., Creamer, R., Dombos, M., Graefe, U., Krogh, P.P.H.H., Sousa, J.J.P., Peres, G., Rutgers, M., Winding, A., Römbke, J., Roembke, J., Bispo, A., Cluzeau, D., Creamer, R., Graefe, U., Krogh, P.P.H.H., Sousa, J.J.P., Peres, G., Rutgers, M., Winding, A., 2009. Indicators for Monitoring Soil Biodiversity. Integr. Environ. Assess. Manag. 5, 717.
- Bispo, A., Guellier, C., Martin, É., Sapijanskas, J., Soubelet, H., Chenu, C., 2016. Les sols: Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable. Editions Quae.
- Bouché, M.B., 1972. Lombriciens de France: écologie et systématique, Annales de Zoologie-Écologie animale. Institut National de la Recherche Agronomique.
- Boyer, J., Reversat, G., Lavelle, P., Chabanne, A., 2013. Interactions between earthworms and plant-parasitic nematodes. Eur. J. Soil Biol. 59, 43–47.
- Braos, B.B., Ferreira, M.E., da Cruz, M.C.P., Braos, L.B., Barbosa, J.C., 2016. Mild and moderate extraction methods to assess potentially available soil organic nitrogen. Rev. Bras. Cienc. do Solo 40, 1–13.
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., 2018. Soil quality—A critical review. Soil Biol. Biochem. 120, 105–125.
- Bunning, S., Jiménez, J.J., 2003. Indicators and assessment of soil biodiversity/soil ecosystem functioning for farmers and governments, in: Proceedings “OECDExpert Meeting on Soil Erosion and Soil Biodiversity Indicators”, Rome. pp. 1–16.
- Buyse, P., Schnepf-Kiss, A.-C., Carnol, M., Malchair, S., Roisin, C., Aubinet, M., 2013. Fifty years of crop residue management have a limited impact on soil heterotrophic respiration. Agric. For. Meteorol. 180, 102–111.
- Carney, K.M., Hungate, B.A., Drake, B.G., Megonigal, J.P., 2007. Altered soil microbial community at elevated CO₂ leads to loss of soil carbon. Proc. Natl. Acad. Sci. 104, 4990–4995.
- Carpenter-Boggs, L., Kennedy, A.C., Reganold, J.P., 2000. Organic and Biodynamic Management : Effects on Soil Biology. Soil Sci. Soc. Am. 64, 1651–1659.
- Chartin, C., Krüger, I., Stevens, A., van Wesemael, B., Carnol, M., 2015. CARBIOSOL I - Carbone

- organique, biomasse et activité microbienne des sols: vers un indicateur de la qualité des sols en Wallonie.
- Chartin, C., Krüger, I., van Wesemael, B., Carnol, M., 2016. CARBIOSOL III - Carbone organique, biomasse et activité microbienne des sols: vers un indicateur de la qualité des sols en Wallonie.
- Chartin, C., Stevens, A., Goidts, E., Krüger, I., Carnol, M., van Wesemael, B., 2017. Mapping Soil Organic Carbon stocks and estimating uncertainties at the regional scale following a legacy sampling strategy (Southern Belgium, Wallonia). *Geoderma Reg.* 9, 73–86.
- Cleveland, C.C., Liptzin, D., 2007. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? *Biogeochemistry* 85, 235–252.
- D’Hose, T., Cougnon, M., De Vlieghe, A., Vandecasteele, B., Viaene, N., Cornelis, W., Van Bockstaele, E., Reheul, D., 2014. The positive relationship between soil quality and crop production: A case study on the effect of farm compost application. *Appl. Soil Ecol.* 75, 189–198.
- Dalal, R., 1998. Soil microbial biomass—what do the numbers really mean? *Anim. Prod. Sci.*
- Dalal, R.C., Chan, K.Y., 2001. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt. *Soil Res.* 39, 435–464.
- DGO3, 2017. Rapport sur l’état de l’environnement Wallon 2017.
- Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A., Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and Assessing Soil Quality, in: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, pp. 1–21.
- Doran, J.W., Safley, M., 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In “*Biological Indicators of Soil Health*”, in: *Biological Indicators of Soil Health*. pp. 1–28.
- Doran, J.W., Zeiss, M.R., 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.* 15, 3–11.
- Duru, M., Therond, O., Martin, G., Martin-Clouaire, R., Magne, M.A., Justes, E., Journet, E.P., Aubertot, J.N., Savary, S., Bergez, J.E., Sarthou, J.P., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 1259–1281.
- Edwards, C.A., 1969. Soil Pollutants and Soil Animals. *Sci. Am.*
- Eijsackers, H., 2004. Leading concepts towards vital soil, in: *Developments in Soil Science*. Elsevier, pp. 1–20.
- Eisenhauer, N., 2010. The action of an animal ecosystem engineer: Identification of the main mechanisms of earthworm impacts on soil microarthropods. *Pedobiologia (Jena)*. 53, 343–352.
- Feng, W., Plante, A.F., Six, J., 2013. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry* 112, 81–93.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., others, 2005. Global consequences of land use. *Science (80-.)*. 309, 570–574.
- Frąc, M., Oszust, K., Lipiec, J., 2012. Community Level Physiological Profiles (CLPP), Characterization and Microbial Activity of Soil Amended with Dairy Sewage Sludge. *Sensors (Basel)*. 12, 3253–3268.
- Gałązka, A., Gawryjółek, K., Grządziel, J., Frąc, M., Książak, J., 2017. Microbial community diversity and the interaction of soil under maize growth in different cultivation techniques. *Plant, Soil Environ.* 63, 264–270.
- García-Orenes, F., Guerrero, C., Roldán, A., Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Campoy, M., Zornoza, R., Bárcenas, G., Caravaca, F., 2010. Soil microbial biomass and activity under different agricultural management systems in a semiarid Mediterranean agroecosystem. *Soil Tillage Res.* 109, 110–115.
- Genot, V., Colinet, G., Bock, L., Vanvyve, D., Reusen, Y., Dardenne, P., 2011. Near infrared reflectance spectroscopy for estimating soil characteristics valuable in the diagnosis of soil fertility. *J. Near*

- Infrared Spectrosc. 19, 117–138.
- Germon, J.C., Taureau, J.C., Thomas, J.M., 1994. Effets des méthodes simplifiées de travail du sol sur les transformations de l'azote et leurs conséquences sur le lessivage des nitrates. COLLOQUES-INRA 125.
- Ghani, A., Dexter, M., Perrott, K.W., 2003. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biol. Biochem.* 35, 1231–1243.
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M.C., Seoane, S., 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.*
- Giller, K.E., Beare, M.H., Lavelle, P., Izac, A.-M., Swift, M.J., 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. *Appl. soil Ecol.* 6, 3–16.
- Goidts, E., van Wesemael, B., 2007. Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in Southern Belgium (1955-2005). *Geoderma* 141, 341–354.
- Goidts, E., Van Wesemael, B., Crucifix, M., 2009a. Magnitude and sources of uncertainties in soil organic carbon (SOC) stock assessments at various scales. *Eur. J. Soil Sci.* 60, 723–739.
- Goidts, E., Van Wesemael, B., Van Oost, K., 2009b. Driving forces of soil organic carbon evolution at the landscape and regional scale using data from a stratified soil monitoring. *Glob. Chang. Biol.* 15, 2981–3000.
- Gomez, E., Ferreras, L., Toresani, S., 2006. Soil bacterial functional diversity as influenced by organic amendment application. *Bioresour. Technol.* 97, 1484–1489.
- Gregorich, E.G., Monreal, C.M., Carter, M.R., Angers, D.A., Ellert, B.H., 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74, 367–385.
- Güsewell, S., Gessner, M.O., 2009. N: P ratios influence litter decomposition and colonization by fungi and bacteria in microcosms. *Funct. Ecol.* 23, 211–219.
- Hart, S.C., Stark, J.M., Davidson, E.A., Firestone, M.K., Weaver, R.L., Angle, S., Bottomley, P., Bezdiecek, D., Smith, S., Tabatabai, A., 1994. Methods of soil analysis, part 2. Microbiological and biochemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wis* 985–1017.
- Hassink, J., 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil* 191, 77–87.
- Haynes, R.J., 2000. Interactions between soil organic matter status, cropping history, method of quantification and sample pretreatment and their effects on measured aggregate stability. *Biol. Fertil. Soils* 30, 270–275.
- Hole, D.G., Perkins, A.J., Wilson, J.D., Alexander, I.H., Grice, P. V., Evans, A.D., 2005. Does organic farming benefit biodiversity? *Biol. Conserv.* 122, 113–130.
- Hu, S., Chapin III, F.S., Firestone, M.K., Field, C.B., Chiariello, N.R., 2001. Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO₂. *Nature* 409, 188.
- Islam, M.R., Chauhan, P.S., Kim, Y., Kim, M., Sa, T., 2011. Community level functional diversity and enzyme activities in paddy soils under different long-term fertilizer management practices. *Biol. Fertil. Soils* 47, 599–604.
- ISO 10694, 1995. Qualité du sol -- Dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche (analyse élémentaire).
- Janzen, H.H., 2006. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biol. Biochem.* 38, 419–424.
- Jenkinson, D.S., Brookes, P.C., Powlson, D.S., 2004. Measuring soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 36.
- Jenkinson, D.S., Ladd, J.N., 1981. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. *Soil Biochem.* 5, 415–471.
- Joergensen, R., Mueller, T., 1995. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial

- biomass: calibration of the kEN value. *Soil Biol. Fertil. a key to Sustain. L. use Agric.* 0717, 33–37.
- Joergensen, R.G., 1996. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the kEC value. *Soil Biol. Biochem.* 28, 25–31.
- Jonard, F., Mahmoudzadeh, M., Roisin, C., Weihermüller, L., André, F., Minet, J., Vereecken, H., Lambot, S., 2013. Characterization of tillage effects on the spatial variation of soil properties using ground-penetrating radar and electromagnetic induction. *Geoderma* 207, 310–322.
- Juan, L.I., Zhao, B., Li, X., Jiang, R., Bing, S.H., 2008. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on microbial biomass, soil enzyme activities and soil fertility. *Agric. Sci. China* 7, 336–343.
- Karlen, D.L., Ditzler, C.A., Andrews, S.S., 2003. Soil quality: Why and how? *Geoderma* 114, 145–156.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E., 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4–10.
- Koch, A., Mcbratney, A., Adams, M., Field, D., Hill, R., Crawford, J., Minasny, B., Lal, R., Abbott, L., O'Donnell, A., Angers, D., Baldock, J., Barbier, E., Binkley, D., Parton, W., Wall, D.H., Bird, M., Bouma, J., Chenu, C., Flora, C.B., Goulding, K., Grunwald, S., Hempel, J., Jastrow, J., Lehmann, J., Lorenz, K., Morgan, C.L., Rice, C.W., Whitehead, D., Young, I., Zimmermann, M., 2013. Soil Security: Solving the Global Soil Crisis. *Glob. Policy* 4, 434–441.
- Kremen, C., Miles, A., 2012. Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs. *Ecol. Soc.* 17.
- Krüger, I., Chartin, C., Carnol, M., van Wesemael, B., 2018a. CARBIOSOL IV - Développement d'indicateurs de la qualité biologique et du carbone organique du sol pour l'évaluation de l'état des sols en Wallonie. Liège.
- Krüger, I., Chartin, C., Carnol, M., van Wesemael, B., 2015. CARBIOSOL II - Carbone organique, biomasse et activité microbienne des sols: vers un indicateur de la qualité des sols en Wallonie.
- Krüger, I., Chartin, C., van Wesemael, B., Carnol, M., 2018b. Defining a reference system for biological indicators of agricultural soil quality in Wallonia, Belgium. *Biol. Indic.* 95, 568–578.
- Krüger, I., Chartin, C., van Wesemael, B., Malchair, S., Carnol, M., 2017. Integrating biological indicators in a Soil Monitoring Network (SMN) to improve soil quality diagnosis – a case study in Southern Belgium (Wallonia). *Biotechnol. Agron. Soc. Env.* 21, 219–230.
- Lal, R., 2016. Soil health and carbon management. *Food Energy Secur.* 5, 212–222.
- Lal, R., 2009. Challenges and opportunities in soil organic matter research. *Eur. J. Soil Sci.* 60, 158–169.
- Larson, W., Pierce, F., 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. dl.sciencesocieties.org.
- Lavaud, A., 2010. Extraction et caractérisation de la matière organique soluble des horizons profonds d'un sol arable.
- Lavelle, P., Lattaud, C., Trigo, D., Barois, I., 1995. Mutualism and biodiversity in soils. *Plant Soil* 170, 23–33.
- Lawton, J.H., 1994. What Do Species Do in Ecosystems? *Oikos* 71, 367.
- Le Villio, M., Arrouays, D., Deslais, W., Daroussin, J., Bissonais, Y. Le, 2001. Estimation des quantités de matière organique exogène nécessaires pour restaurer et entretenir les sols limoneux français à un niveau organique donné.
- Lechevallier, C., Planques, B., Salducci, X., 2004. Évaluer la dynamique biologique des sols.
- Leifeld, J., Siebert, S., Kögel-Knabner, I., 2002. Biological activity and organic matter mineralization of soils amended with biowaste composts. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 151–159.
- Lettens, S., Van Orshoven, J., Perrin, D., Wesemael, B.V.A.N., Muys, B., 2008. Organic carbon stocks and stock changes of forest biomass in Belgium derived from forest inventory data in a spatially

- explicit approach. *Ann. For. Sci.* 65, 1.
- Malchair, S., Halen, H., Moutier, M., Carnol, M., 2010. Appreciation of biological indicators as tools for evaluating soil quality.
- Mangalassery, S., Mooney, S.J., Sparkes, D.L., Fraser, W.T., Sjögersten, S., 2015. Impacts of zero tillage on soil enzyme activities, microbial characteristics and organic matter functional chemistry in temperate soils. *Eur. J. Soil Biol.* 68, 9–17.
- Maraun, M.; Scheu, S., 1999. Middens of the earthworm *Lumbricus terrestris* (Lumbricidae): microhabitats for micro- and mesofauna in forest soils. *Pedobiologia (Jena)*. 43, 276–287.
- Martin, P., Somer, L., 2018. Panorama des filières bois-énergie et agrocombustibles en Wallonie, ValBiom.
- Mary, B., Beaudoin, N., Justes, E., Machet, J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *Eur. J. Soil Sci.* 50, 549–566.
- McGill, W.B., Hunt, H.W., Woodmansee, R.G., Reuss, J.O., 1981. Phoenix, a model of the dynamics of carbon and nitrogen in grassland soils, *Ecological Bulletins (Sweden)*. Swedish Natural Science Research Council.
- MEA, 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*, Millennium Ecosystem Assessment. Washington, DC.
- 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.
- Ménard, O., 2005. Les ouvriers du sol et les pratiques agricoles de conservation. CRAAQ.
- Minet, O., Ferber, F., Jacob, L., Lecler, B., Agneessens, R., Cugnon, T., Decruyenaere, V., Genot, V., Gofflot, S., Pitchugina, E., Planchon, V., Renneson, M., Sinnaeve, G., Wavreille, B., Dardenne, P., Baeten, V., 2016. REQUASUD - La spectroscopie proche infrarouge : une technologie rapide, précise et écologique pour déterminer la composition et la qualité des produits agricoles et alimentaires.
- Morvan, X., Saby, N.P.A., Arrouays, D., Le Bas, C., Jones, R.J.A., Verheijen, F.G.A., Bellamy, P.H., Stephens, M., Kibblewhite, M.G., 2008. Soil monitoring in Europe: A review of existing systems and requirements for harmonisation. *Sci. Total Environ.*
- N'Dayegamiye, A., 2007. La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO: facteur climatique et régies agricoles influençant les taux de minéralisation de l'azote. CRAAQ - Colloq. sur l'azote.
- Nortcliff, S., 2002. Standardisation of soil quality attributes. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88, 161–168.
- Pankhurst, C., Doube, B.M., Gupta, V., 1997. *Biological indicators of soil health*. Cab International Wallingford.
- Pankhurst, C.E., Ophel-Keller, K., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R., 1996. Biodiversity of soil microbial communities in agricultural systems. *Biodivers. Conserv.* 5, 197–209.
- Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J.-P., Chenu, C., Colnenne-David, C., De Cara, S., Delame, N., 2017. Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture. *Environ. Sci. Policy* 77, 130–139.
- Pelosi, C., Bertrand, M., Roger-Estrade, J., 2009. Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 287–295.
- Pelosi, C., Toutous, L., Chiron, F., Dubs, F., Hedde, M., Muratet, A., Ponge, J.F., Salmon, S., Makowski, D., 2013. Reduction of pesticide use can increase earthworm populations in wheat crops in a European temperate region. *Agric. Ecosyst. Environ.* 181, 223–230.
- Pérès, G., Vandenbulcke, F., Guernion, M., Hedde, M., Beguiristain, T., Douay, F., Houot, S., Piron, D., Richard, A., Bispo, A., Grand, C., Galsomies, L., Cluzeau, D., 2011. Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment: An example from the national

- Bioindicator programme. *Pedobiologia - Int. J. Soil Biol.* 54, S77–S87.
- Priha, O., Smolander, A., 1999. Nitrogen transformations in soil under *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* at two forest sites. *Soil Biol. Biochem.* 31, 965–977.
- Pulleman, M., Creamer, R., Hamer, U., Helder, J., Pelosi, C., Pérès, G., Rutgers, M., 2012. Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services-an overview of European approaches. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4, 529–538.
- Robert, M., Chenu, C., 1992. Interactions between soil minerals and microorganisms, in: *Soil Biochemistry*. pp. 307–404.
- Robertson, G.P., Coleman, D.C., Sollins, P., Bledsoe, C.S., 1999. Standard soil methods for long-term ecological research. Oxford University Press on Demand.
- Romig, D.E., Garlynd, M.J., Harris, R.F., 1996. Farmer-Based Assessment of Soil Quality: A Soil Health Scorecard 1. *Methods Assess. soil Qual.* 39–60.
- Schmidt, M.W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Trumbore, S.E., 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49–56.
- Schrumpf, M., Schumacher, J., Schöning, I., Schulze, E.-D., 2008. Monitoring Carbon Stock Changes in European Soils: Process Understanding and Sampling Strategies, in: Dolman, A.J., Valentini, R., Freibauer, A. (Eds.), *Ecological Studies*. Springer New York, pp. 153–189.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Denef, K., 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79, 7–31.
- Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S.J., Gregorich, E.G., Paul, E.A., Paustian, K., 2002. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1981–1987.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1350–1358.
- Smith, J.L., Paul, E.A., 1990. The significance of soil microbial biomass estimations. *Soil Biochem.* Vol. 6, 357–396.
- Sparling, G., 1998. Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C. *Soil Biol.*
- SPW, DGO3, D., 2018. Composantes environnementales et liens environnement-santé. *Environnement physique : Régions agricoles*.
- Strickland, M.S., Rousk, J., 2010. Considering fungal:bacterial dominance in soils – Methods, controls, and ecosystem implications. *Soil Biol. Biochem.* 42, 1385–1395.
- Thomson, L.J., Hoffmann, A.A., 2007. Effects of ground cover (straw and compost) on the abundance of natural enemies and soil macro invertebrates in vineyards. *Agric. For. Entomol.* 9, 173–179.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*.
- Tiunov, A. V., Scheu, S., 1999. Microbial respiration, biomass, biovolume and nutrient status in burrow walls of *Lumbricus terrestris* L. (Lumbricidae). *Soil Biol. Biochem.* 31, 2039–2048.
- Tóth, G., Stolbovoy, V., Montanarella, L., European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability., 2007. Soil quality and sustainability evaluation : an integrated approach to support soil-related policies in the European Union: a JRC position paper. Publications Office.
- Trigalet, S., Chartin, C., Krüger, I., Carnol, M., Oost, K. Van, Van Wesemael, B., 2017. Soil organic carbon fractionation for improving agricultural soil quality assessment – a case study in Southern Belgium (Wallonia). *Biotechnol. Agron. Soc. Env.* 21, 191–200.
- Tsiafouli, M.A., Thébault, E., Sgardelis, S.P., De Ruiter, P.C., Van Der Putten, W.H., Birkhofer, K.,

- Hemerik, L., De Vries, F.T., Bardgett, R.D., Brady, M.V., 2015. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Glob. Chang. Biol.* 21, 973–985.
- Van-Camp, L., Bujarrabal, B., Gentile, A.R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazabal, C., Selvaradjou, S., 2004. Reports of the technical working groups established under the thematic strategy for soil protection [WWW Document]. Off. Off. Publ. Eur. Communities Luxemb. Gd. Luxemb. En ligne. <http://ec.europa.eu>.
- Van-Camp, L., Bujarrabal, B., Gentile, A.R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazabal, C., Selvaradjou, S.K., 2004. Organic Matter and Biodiversity. Reports Tech. Work. groups Establ. under Themat. Strateg. soil Prot. 3, 311–496.
- van Capelle, C., Schrader, S., Brunotte, J., 2012. Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota - A review with a focus on German data. *Eur. J. Soil Biol.* 50, 165–181.
- van Diepeningen, A.D., de Vos, O.J., Korthals, G.W., van Bruggen, A.H.C., 2006. Effects of organic versus conventional management on chemical and biological parameters in agricultural soils. *Appl. Soil Ecol.* 31, 120–135.
- van Leeuwen, J.P., Djukic, I., Bloem, J., Lehtinen, T., Hemerik, L., de Ruiter, P.C., Lair, G.J., 2017. Effects of land use on soil microbial biomass, activity and community structure at different soil depths in the Danube floodplain. *Eur. J. Soil Biol.* 79, 14–20.
- van Leeuwen, J.P., Lehtinen, T., Lair, G.J., Bloem, J., Hemerik, L., Ragnarsdóttir, K. V, Gísladóttir, G., Newton, J.S., de Ruiter, P.C., 2015. An ecosystem approach to assess soil quality in organically and conventionally managed farms in Iceland and Austria. *Soil* 1, 83–101.
- van Wesemael, B., Chartin, C., Wiesmeier, M., von Lützow, M., Hobley, E., Carnol, M., Krüger, I., Campion, M., Roisin, C., Hennart, S., Kögel Knabner, I., 2019. An indicator for organic matter dynamics in temperate agricultural soils. *Agric. Ecosyst. Environ.* 274, 62–75.
- Violle, C., Navas, M.L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., Garnier, E., 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos* 116, 882–892.
- von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., Marschner, B., 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biol. Biochem.* 39, 2183–2207.
- Wallace, K.J., 2007. Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biol. Conserv.* 139, 235–246.
- Walle, I. Vande, Van Camp, N., Perrin, D., Lemeur, R., Verheyen, K., Van Wesemael, B., Laitat, E., 2005. Growing stock-based assessment of the carbon stock in the Belgian forest biomass. *Ann. For. Sci.* 62, 853–864.
- Warkentin, B.P., 1995. The changing concept of soil quality, *Journal of soil and water conservation*. Soil and Water Conservation Society.
- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., Peigné, J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 1–20.
- Wiesmeier, M., Hübner, R., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., Von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., 2014. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation. *Glob. Chang. Biol.* 20, 653–665.
- Wood, M., Litterick, A.M., 2017. Soil health - What should the doctor order? *Soil Use Manag.* 33, 339–345.

ANNEXES

Liste des annexes

Annexe 1	Brochure « La qualité biologique des sols agricoles en Wallonie »	p.44
Annexe 2	Canevas de présentation des données « CARBIOSOL : Indicateurs biologiques et carbone organique des sols agricoles wallons »	p.124
Annexe 3	Canevas de présentation des données « REFERENTIEL wallon de la qualité biologique des sols agricoles »	p.132
Annexe 4	Canevas de présentation des données « LIBRARIE SPECTRALE wallonne des teneurs en fractions de carbone des sols »	p.143
Annexe 5	Scripts informatiques du logiciel R pour les sorties statistiques et graphiques de la base de données « CARBIOSOL »	p.148
Annexe 6	Scripts informatiques du logiciel R pour les sorties et mises à jours cartographiques	p.158
Annexe 7	Article dans un journal scientifique : Data-paper soumis dans Ecology.	p.193
Annexe 9	Data-mapping	p.195
Annexe 9	Prototype de bulletin d’analyse	p.198
Annexe 10	Programme de la demi-journée « Mesurer la qualité biologique des sols agricoles » du 17/01/2019	p.203

ANNEXE 1 :

Brochure « La qualité biologique des sols agricoles
en Wallonie »

Guide sur les indicateurs biologiques et le carbone
organique des sols agricoles en Wallonie

La qualité biologique et le carbone organique des sols agricoles en Wallonie

Service Public de Wallonie

DIRECTION GENERALE OPERATIONNELLE
AGRICULTURE, RESSOURCES NATURELLES ET
ENVIRONNEMENT

Direction de la Protection des Sols

Université de Liège

Université Catholique de Louvain

Quentin Vincent¹, Caroline Chartin², Inken Krüger¹,
Bas van Wesemael², Monique Carnol¹

¹Laboratoire d'écologie végétale et microbienne, InBioS,
Université de Liège, Bât. B22, Chemin de la vallée 4, 4000 Liège

²Georges Lemaître Centre for Earth and Climate Research, Earth
and Life Institute. Université Catholique de Louvain, 1348 Louvain-
la-Neuve



Wallonie



La qualité biologique et le carbone organique des sols agricoles en Wallonie

COMMANDITAIRE :

SERVICE PUBLIC de WALLONIE, DIRECTION GENERALE OPERATIONNELLE AGRICULTURE,
RESSOURCES NATURELLES ET ENVIRONNEMENT

Direction de la Protection des Sols

Avenue Prince de Liège, 15
B-5100 NAMUR

AUTEURS :

Quentin Vincent^{1*}, Caroline Chartin², Inken Krüger^{1*}, Bas van Wesemael², Monique Carnol¹

¹Laboratoire d'écologie végétale et microbienne, InBioS, Université de Liège, Bât. B22, Chemin de la vallée 4, 4000 Liège

²Georges Lemaître Centre for Earth and Climate Research, Earth and Life Institute. Université Catholique de Louvain, 1348 Louvain-la-Neuve

* Contribution équivalente

DATE:

REFERENCE:

ISBN:

Table des matières

1	Introduction générale	49
2	La qualité biologique des sols	50
2.1	Fertilité, santé et qualité des sols	50
2.2.	Mesurer la qualité biologique des sols	52
3	Le réseau de surveillance des sols (RSS) CARBIOSOL.....	52
4	Les indicateurs du RSS CARBIOSOL - mesures et gammes de référence	57
4.1	Prélèvement, préparation et stockage des échantillons	59
4.2	Carbone organique total du sol	61
4.3	Fraction grossière de carbone organique du sol	64
4.4	Fraction fine de carbone organique du sol	69
4.5	Carbone extrait à l'eau froide et à l'eau chaude	72
4.6	Azote extrait à l'eau froide et l'eau chaude.....	76
4.7	La biomasse microbienne (carbone microbien) et l'azote microbien	80
4.8	Rapport Cmic/Nmic.....	84
4.9	Potentiel métabolique	87
4.10	Respiration potentielle	90
4.11	Minéralisation nette de l'azote.....	93
4.12	Densité en vers de terre	97
4.13	Quotient métabolique	101
4.14	Quotient microbien.....	104
5	Base de données et outils associés	107
5.1	Les bases de données 'CARBIOSOL' et 'REFERENTIEL'	107
5.2	Corrélogramme.....	108
5.3	Outils graphiques et cartographiques	109
6	Exemple d'application des indicateurs - Effets de l'exploitation et des pratiques agricoles.	112
7	Références bibliographiques	118

1 Introduction générale

Les sols sont à la base de la production agricole et par conséquent de notre alimentation. Les pratiques agricoles influencent les propriétés des sols à court et à long terme (Larson and Pierce, 1994). L'agriculture intensive a notamment de nombreux effets négatifs sur les sols, comme par exemple la perte de biodiversité, une plus grande sensibilité à l'érosion ou le déclin de la matière organique (Tilman *et al.*, 2002). Comme partout dans le monde, cette dégradation progressive de la qualité des sols agricoles est également un réel problème en Wallonie (Goidts et van Wesemael., 2007). Par exemple, par rapport à la période 1949-1972, les sols sous cultures ont subi une diminution moyenne de 20% de leur teneur en carbone organique, tandis que la superficie de sols carencés a presque triplée (Rapport sur l'état de l'environnement wallon 2017 (REEW 2017) ; DGO3, 2017).

Or, les sols sont considérés comme une ressource non renouvelable à l'échelle des générations humaines (Lal, 2009). Une prise de conscience de l'ampleur des effets des activités humaines sur les sols a mené les décideurs à élaborer des outils pour le suivi de la qualité des sols, afin de surveiller l'évolution des sols, de limiter leur dégradation et de favoriser des pratiques qui permettent une utilisation⁴ durable des sols. Ainsi, des réseaux de surveillance ont été établis dans la majorité des pays européens, y compris la Belgique. Un réseau de surveillance est composé d'un ensemble de sites où des indicateurs de la qualité du sol sont mesurés régulièrement (Morvan *et al.*, 2008). Traditionnellement, des indicateurs chimiques et physiques comme la texture, la densité apparente, le pH ou la teneur totale en carbone organique du sol (COT) sont utilisés pour évaluer un sol agricole et en déduire des conseils de gestion adaptés (Gregorich *et al.*, 1994). Le COT est une mesure fondamentale, associée à différents processus physiques, chimiques et biologiques du sol (Six *et al.*, 2004; Koch *et al.*, 2013). Cependant, la dynamique du COT est lente et ses changements ne sont détectables qu'après plusieurs années ou décennies (Goidts and van Wesemael, 2007). De plus, le carbone organique du sol n'est nullement homogène (von Lützwow *et al.*, 2007) ; il s'agit plutôt de divers composés carbonés avec des temps de décomposition fortement variables (Schmidt *et al.*, 2011). La séparation des fractions carbonées en fractions labiles et stables aide à distinguer les tendances à long terme (taux de renouvellement de 100 ans ou plus), importants pour la stabilisation de la matière organique dans le sol (fraction stable), des processus liés à la transformation de la matière organique, impliqués dans la fertilité actuelle des sols (fraction labile) (Trigalet *et al.*, 2017; van Wesemael *et al.*, 2019).

⁴ Utilisation (du territoire) : « fonction ou usage d'un type d'occupation du sol (par ex. une occupation de type « pelouse » peut correspondre à une utilisation « jardin résidentiel » ou « pâturage »). » Rapport sur l'état de l'environnement wallon (EEW) (2017). Cinq utilisations sont définies dans le rapport de l'EEW (2017) : (1) terrain artificialisés, (2) terrains de nature inconnues/non cadastrés, (3) terrains agricoles, (4) terrains boisés et (5) autres terrains non artificialisés.

Cependant, les paramètres physico-chimiques ne rendent pas ou peu compte des propriétés biologiques du sol. Or, les organismes du sol interviennent directement dans la dégradation de la matière organique, et leur activité est par conséquent liée à la libération des éléments nutritifs pour les plantes. L'abondance, la diversité et l'activité des organismes du sol (principalement micro-organismes, micro- et mésofaune) fournissent des informations complémentaires aux mesures physico-chimiques sur le fonctionnement⁵ des sols. De plus, les paramètres biologiques réagissent plus rapidement aux changements que le COT et ils permettent donc d'établir un diagnostic précoce des effets de modifications de l'environnement.

En Wallonie, un réseau de laboratoires provinciaux (<http://www.requasud.be/presentation/>) fournit des analyses de sol pour les agriculteurs. Jusqu'à présent, l'évaluation des sols comprend des paramètres chimiques et physiques (Genot *et al.*, 2011), mais une demande croissante concerne des mesures liées à l'activité biologique des sols. Le projet de recherche CARBIOSOL (financement SPW-DGO3 ; juillet 2013-janvier 2019) répond à ce besoin par l'étude de nouveaux indicateurs (fractions de carbone et indicateurs biologiques) et par l'évaluation de leur capacité à mesurer la qualité des sols agricoles en Wallonie.

Cette brochure vise à informer le personnel des laboratoires d'analyse et d'autres utilisateurs potentiels sur les opportunités et les perspectives que nous offrent ces nouveaux indicateurs de la qualité du sol. Les possibilités de leur utilisation sont détaillées et des protocoles de mesure, adaptés aux caractéristiques des sols agricoles en Wallonie, sont présentés.

2 La qualité biologique des sols

2.1 Fertilité, santé et qualité des sols

Plusieurs concepts sont utilisés pour décrire les caractéristiques globales des sols. En agriculture, la fonction essentielle d'un sol est sa capacité à supporter la croissance végétale (Gil-Sotres *et al.*, 2005). Cette fonction se réfère à la **fertilité du sol**, qui peut être définie comme « *la capacité du sol à répondre aux besoins physiques, chimiques et biologiques nécessaires à la croissance des plantes, pour leur productivité, leur reproduction et leur qualité (considérée en termes de bien-être humain et animal dans les cas des plantes utilisées comme nourriture ou comme fourrage), de manière adaptée au type de plante, au type de sol, à l'usage des sols et aux conditions climatiques* » (Abbott and Murphy, 2003). L'évaluation de la fertilité des sols est principalement basée sur des analyses physico-chimiques, y compris le contenu et la disponibilité en éléments nutritifs.

⁵ Fonction (écosystémique) ou fonction écologique : processus lié à des flux de matières et d'énergies dans un écosystème (Wallace, 2007).

Depuis les années 1970, l'intérêt pour le fonctionnement du sol, au-delà de la production agricole, a gagné de l'importance (Lal, 2016). Ainsi, la notion de **qualité des sols** tient compte de l'interaction hommes-sols, en particulier, du type d'usage, des priorités et des exigences de la société (Wartekin et Fletcher, 1977 ; Bispo *et al.*, 2016). La qualité d'un sol a été définie comme « *la capacité continue à fonctionner comme un système vivant, au sein d'écosystèmes naturels ou gérés, dans le but de maintenir la productivité biologique, de maintenir ou d'augmenter la qualité de l'eau et de l'air et de promouvoir la santé des animaux, des végétaux et des humains* » (Doran *et al.*, 1994) et « **la capacité du sol à remplir ses fonctions** » (Karlen *et al.*, 1997). Le concept a évolué par l'intégration de la biodiversité des sols : « *la qualité des sols est leur capacité à maintenir un fonctionnement correct grâce à une biodiversité de processus et d'organismes qui réalisent ces processus* » (Eijsackers, 2004). Le Centre commun de recherche de la commission européenne propose de définir la qualité du sol par « *une mesure de l'aptitude d'un sol à fournir des services écosystémiques et sociaux par sa capacité à maintenir ses fonctions sous des conditions changeantes* » (Tóth *et al.*, 2007).

Le terme **santé du sol** trouve son origine dans le lien entre la qualité du sol et la santé des animaux, humains et la qualité des cultures (Warkentin, 1995). Aussi, ce concept se veut plus holistique : « la capacité du sol à maintenir à long terme l'ensemble de ses propriétés et de ses fonctions, indépendamment d'un usage particulier » (Acton et Gregorich, 1995 dans Bispo *et al.*, 2016). Cependant, ce concept reste difficile à concrétiser, car, contrairement au système médical, disposant d'indicateurs et de gammes de valeurs précises, la grande variation en termes de types et caractéristiques des sols rend le choix des indicateurs et la définition de gammes de valeurs de référence difficile. Certains notent encore que les scientifiques préfèrent le terme qualité, alors que les agriculteurs préfèrent le terme « santé » (Romig *et al.*, 1996 dans Bünemann *et al.*, 2018) et considèrent les deux termes comme équivalents (Bünemann *et al.*, 2018).

En résumé, le terme fertilité se réfère plus spécifiquement au lien avec la croissance des plantes, le terme qualité tient compte de l'utilisation des sols, et le terme santé englobe une qualité à long terme, indépendamment de l'usage des sols. Comme nous nous intéressons aux caractéristiques des sols influencées par les pratiques agricoles, nous utiliserons alors le terme « qualité des sols ».

L'évaluation de la qualité d'un sol peut s'effectuer par l'utilisation d'indicateurs. Ces indicateurs sont liés aux propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols et doivent répondre à un certain nombre d'exigences et de critères (Doran and Safley, 1997 dans Pankhurst *et al.*, 1997). Ces critères peuvent être d'ordre conceptuel (p.ex. lien avec une menace pesant sur le sol), liés aux pratiques (p.ex. coût), ou liés à la sensibilité des indicateurs pour répondre à un changement (p.ex. à la gestion) ou à la facilité d'interprétation des résultats. Il n'existe pas de consensus par rapport aux types d'indicateurs à utiliser et, par conséquent, les indicateurs diffèrent grandement entre les réseaux de mesure, provenant de

différents pays, en fonction des objectifs du suivi. Par exemple, le programme « Bioindicateur 2 » de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) en France se base sur le coût, la normalisation de la mesure, la facilité d'acquisition de la donnée et la facilité d'interpréter la donnée pour sélectionner les indicateurs.

2.2 Mesurer la qualité biologique des sols

La qualité biologique des sols fait référence à l'abondance, la diversité et l'activité⁶ des organismes vivants qui interviennent dans le fonctionnement des sols, permettant de remplir des fonctions essentielles comme la production de biomasse, le stockage de carbone (C), la régulation d'espèces nuisibles, la dégradation de polluants, les cycles biogéochimiques (Chaussod, 1996 ; DGO3, 2017). Alors que l'importance de l'activité des micro-organismes comme indicateur précoce de la fertilité permanente d'un sol est reconnue depuis les années 1920 (Waksman et Starkey, 1924 dans Wood *et al.*, 2016), leur utilisation comme indicateur dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols est récente.

L'étude des indicateurs biologiques de la qualité des sols est pourtant d'un grand intérêt (Krüger *et al.*, 2016) puisque ces indicateurs vont à la fois (i) dépendre des conditions physico-chimiques du sol, des pratiques agricoles, (ii) intervenir directement dans les fonctions de l'écosystème et (iii) répondre plus rapidement aux changements environnementaux que le COT. Ces indicateurs biologiques permettent d'acquérir des informations complémentaires aux indicateurs chimiques, et d'évaluer plus précisément certaines fonctions liées à la qualité du sol comme le cycle des nutriments (minéralisation nette de l'azote), l'activité microbienne (potentiel de respiration) ou la transformation de la matière organique (biomasse microbienne).

La qualité du sol dépend également de caractéristiques inhérentes au sol (géologie, relief, texture etc.) et de caractéristiques dynamiques (météorologie, perturbations physiques ou chimiques etc.) (Karlen *et al.*, 2003), qui doivent donc être pris en compte dans l'évaluation de la qualité des sols. Le mode de gestion du sol influence également certaines caractéristiques dynamiques, et il peut ainsi influencer la qualité biologique du sol.

3 Le réseau de surveillance des sols (RSS) CARBIOSOL

En Wallonie, le réseau de surveillance des sols (RSS) CARBIOSOL a été établi pour suivre l'évolution des stocks de Carbone organique des sols (COT) agricoles (Goidts *et al.*, 2009a). Le COT est une mesure fondamentale, car associée à différents processus physiques, chimiques et biologiques des sols. Se basant sur ~700 sites, ce réseau a permis de produire des gammes et des cartes de référence, importantes en tant qu'outils d'aide à la décision pour les

⁶ Activité (des organismes) ou fonction biologique: action qui influence la performance d'un organisme et par conséquent sa valeur sélective (Violle *et al.*, 2007).

gestionnaires et décideurs politiques (Chartin *et al.*, 2016; Chartin *et al.*, 2017). Toutefois, comme le COT a une dynamique lente, mesurée en dizaines d'années, il ne peut pas servir comme indicateur précoce de l'évolution de la qualité du sol (Schrumpf *et al.*, 2008).

Afin d'étudier plus précisément la dynamique du carbone, le COT peut être séparé en deux fractions carbonées pour étudier la stabilisation de la matière organique dans le sol (fraction stable) et les processus liés à la transformation de la matière organique, impliqués dans la fertilité actuelle des sols (fraction labile) (Trigalet *et al.*, 2017).

En vue de fournir des informations complémentaires sur les différents aspects de la qualité du sol, des indicateurs relatifs à des processus biologiques ont été introduits dans le réseau. Ces indicateurs biologiques ont été sélectionnés grâce à une recherche bibliographique en fonction des besoins en Wallonie (Malchair *et al.*, 2010). Les critères de sélection étaient basés sur la pertinence des indicateurs biologiques (lien avec des services écosystémiques), l'applicabilité à différents écosystèmes, leur sensibilité à détecter des changements, leur utilisation dans des réseaux existants, ainsi que des critères méthodologiques.

Les points d'échantillonnages pour les fractions du carbone et/ou les indicateurs biologiques sont cartographiés dans la figure 1.

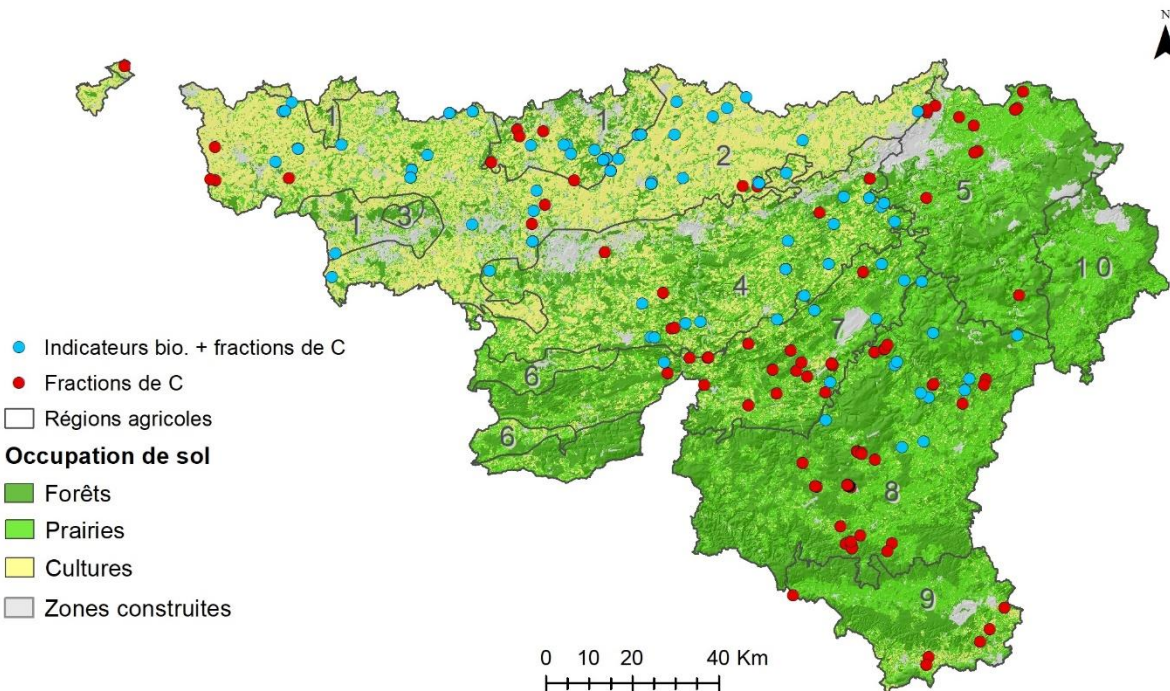


Figure 1: Sites ayant servi à l'établissement de gammes de valeurs tenant compte de la variabilité spatiale et saisonnière des paramètres biologiques. Régions agricoles: 1-Sablo-limoneuse, 2-Limoneuse, 3-Campine Hennuyère, 4-Condruz, 5-Herbagère Liège, 6-Herbagère Fagnes, 7-Famenne, 8-Ardenne, 9-Jurassique, et 10-Haute Ardenne.

En tout, les mesures effectuées via le RSS CARBIOSOL concernent 19 indicateurs de la qualité des sols (hors les mesures du pH). Ces indicateurs sont (i) des indicateurs biologiques mesurant directement l'abondance, la diversité et/ou l'activité d'organismes du sol, (ii) des indicateurs chimiques interagissant fortement avec l'activité biologique des sols.

Le tableau 1 présente succinctement les indicateurs du RSS CARBIOSOL avec leurs définitions et leurs principes de mesure. Des informations précises sont disponibles dans la partie suivante (§4), présentant une fiche descriptive pour chaque indicateur détaillant leur principe de mesure, le matériel nécessaire, les gammes de valeurs en Wallonie et l'interprétation de ces indicateurs.

Tableau 1 : Présentation des indicateurs de la qualité biologique des sols mesurés dans le RSS CARBIOSOL. La variabilité saisonnière a été étudiée par comparaison de données prises tous les deux mois entre avril et octobre 2016.

Indicateur	Définition	Principe	Variabilité saisonnière
Indicateurs chimiques	Carbone organique total	L'ensemble du carbone organique présent dans le sol. Analyses séparées du Carbone Total (CT) et du Carbone Inorganique (CI), puis soustraction du CI au CT afin d'obtenir le carbone organique total (COT).	aucune
	Fraction fine de carbone	Particules libres d'argiles et limons fins et des micro-agrégats - le carbone organique y est stable sous forme de complexes organo-minéraux (<20µm). Un échantillon de sol est fractionné physiquement par tamisage humide à 20µm. La teneur en carbone organique de la fraction fine < 20µm est mesurée selon le même protocole que le COT.	aucune
	Fraction grossière de carbone	Mélange de micro agrégats, de petits macro agrégats et de matière organique particulaire (>20µm). Un échantillon de sol est fractionné physiquement par tamisage humide à 20µm. La teneur en carbone organique de la fraction fine > 20µm est mesurée selon le même protocole que le COT.	aucune
Indicateurs biologiques	Carbone extrait à l'eau froide	Le carbone extrait à l'eau froide est le carbone disponible pour les micro-organismes. Extraction d'un échantillon de sol avec de l'eau froide (20°C) et analyse du carbone organique total dans l'extrait..	octobre<avril=juin = août.
	Carbone extrait à l'eau chaude	Le carbone extrait à l'eau chaude présente une fraction active qui inclut le L'extraction consécutive à l'extraction à l'eau froide d'un échantillon de sol avec de l'eau chaude (80°C) permet la mesure	Juin<avril< août=octobre

	carbone microbien, mais n'est pas limité à celui-ci.	de deux propriétés du sol liées au cycle de carbone.	
Azote extrait à l'eau froide	Mesure permettant le calcul d'indice comme les rapports eau chaude/eau froide ou azote/carbone	Il s'agit d'une extraction d'un échantillon de sol avec de l'eau froide (20°C), suivi de l'analyse de l'azote total dans l'extrait..	juin=août< avril=octobre
Azote extrait à l'eau chaude	Mesure de la quantité d'azote inorganique et organique (minéralisable) potentiellement disponible pour les plantes.	Il s'agit d'une extraction consécutive à l'extraction à l'eau froide d'un échantillon de sol avec de l'eau chaude (80°C).	juin<août< avril<octobre
Biomasse microbienne	La biomasse microbienne est la composante vivante de la matière organique à l'exclusion des macro-organismes et des racines.	Obtenu par fumigation au chloroforme. Le carbone microbien est calculé à partir de la différence entre le carbone organique extrait d'un sol fumigé et celui d'un sol non-fumigé.	aucun
Rapport Cmic/Nmic	Donne des informations sur la composition relative de la communauté microbienne en bactéries et en champignons	Rapport entre le carbone microbien et l'azote microbien.	octobre≤avril= juin≤août
Potentiel métabolique	Mesure de la diversité fonctionnelle de la communauté microbienne du sol. Elle mesure la capacité des bactéries du sol à dégrader différents substrats carbonés.	Un extrait de sol est incubé dans une plaque contenant des puits avec 31 substrats carbonés différents. Les puits deviennent mauve lorsque le substrat est décomposé.	avril≤août= octobre≤juin
Respiration potentielle	Mesure de la vitesse de la minéralisation du carbone organique en CO ₂ lors de la décomposition de la matière organique par les micro-organismes.	La respiration potentielle est mesurée comme production de CO ₂ d'un échantillon de sol frais dans une bouteille hermétiquement fermée dans des conditions définies.	octobre<avril< juin=août
Minéralisation nette de l'azote	Transformation de l'azote sous forme organique en azote minéral (NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻). Elle donne des informations sur la disponibilité de l'azote pour les plantes, indispensable à leur croissance.	Différence entre la quantité d'azote minéral (NH ₄ ⁺ et NO ₃ ⁻) avant et après une incubation de 28 jours à 25°C en absence de racines et de lessivage.	avril≤août= octobre≤juin

Densité des vers de terre	Nombre de vers de terre échantillonné par mètre carré.	Le contact avec une solution de moutarde cause des irritations aux vers de terre qui les font remonter à la surface du sol. Les vers de terre peuvent alors être échantillonnés de manière non-destructive pour le sol.	octobre ≤ avril = juin ≤ août
Quotient métabolique	Quotient éco-physiologique correspondant au rapport entre la respiration potentielle et le carbone microbien. Il représente la quantité de CO2 respiré par unité de biomasse microbienne.	Calculé à partir des mesures du carbone microbien et de la respiration potentielle.	aucune
Quotient microbien	Quotient éco-physiologique correspondant au rapport entre le carbone microbien et le carbone organique total. Il donne des renseignements sur la disponibilité de substrat pour les micro-organismes.	Calculé à partir des mesures de carbone microbien et de carbone organique total.	aucune

Ces indicateurs ont été mesurés sur des sites du réseau CARBOSOL, sur des 'Essais à Long Terme (ELT) du CRAW (Centre wallon de recherches agronomiques), ainsi que sur des sites chez des agriculteurs volontaires. L'ensemble de ces sites forme le RSS CARBIOSOL. Le caractère discriminatoire des indicateurs biologiques choisis a été démontré par une comparaison des gammes de valeurs en Région Limoneuse et en Ardenne (Chartin *et al.*, 2015). Ensuite, la variabilité spatiale et temporelle (notamment saisonnière) a été étudiée (Chartin *et al.*, 2016). Des gammes de valeurs de référence, tenant compte de la variabilité spatiale et saisonnière, ont été établies pour la Wallonie (Krüger *et al.*, 2018). Il s'agit de gammes théoriques, calculées sur base de la variation des valeurs due aux saisons et due à la localisation des sites (addition des variances). Ces données sont essentielles pour la mise en routine d'un outil de diagnostic. La mesure de ces indicateurs sur des ELT et des parcelles agricoles de particuliers a permis d'évaluer l'effet de pratiques de gestion (Krüger *et al.*, 2018; §6 du document).

4 Les indicateurs du RSS CARBIOSOL - mesures et gammes de référence

Les mesures effectuées au sein du RSS CARBIOSOL ont pour but de permettre une évaluation de la qualité des sols wallons en utilisant des indicateurs biologiques. Cette évaluation peut se faire à différentes échelles. Pour les agriculteurs, l'étude à l'échelle de la parcelle est la plus pertinente. La qualité du sol y est évaluée de manière comparative, grâce aux gammes de valeurs servant de référence. Grâce au RSS CARBIOSOL, des gammes de valeurs ont été établies pour tous les indicateurs de la qualité du sol choisis. Ces gammes de valeurs sont définies à l'échelle de la Wallonie pour les sols de culture. Comme les gammes de valeurs tiennent compte de la variabilité saisonnière (Krüger *et al.*, 2018b), elles peuvent être utilisées pendant toute la période de végétation. En dehors de la période de végétation, un échantillonnage pour mesurer la qualité du sol via les indicateurs développés ici n'est pas pertinent.

Des gammes de référence ont été déterminées à partir des données récoltées sur les sites agricoles (54 sites échantillonnés en 2015 et 2016). Pour chaque indicateur, une distribution des valeurs a été calculée à partir de la médiane et de la somme de la variabilité spatiale (données de 2015) et saisonnière (données de 2016). Il s'agit de la racine carrée de la somme des variances spatiale et saisonnière. Ensuite, cinq catégories ont été déterminées sur base de la distribution de ces valeurs calculées (5^{ème} quantile⁷, 25^{ème} quantile, 75^{ème} quantile et 95^{ème} quantile) (Krüger *et al.*, 2018b). Afin de faciliter l'interprétation de ces gammes de

⁷ Quantile : valeur qui divise un jeu de données en intervalles contenant le même nombre de données. Par exemple, le 25^{ème} quantile partage l'échantillon en 25% des données sous lui, et les 75% restant au-dessus de lui.

référence, elles sont chacune séparée en cinq catégories « valeurs très faibles », « valeurs faibles », « valeurs moyennes », « valeurs élevées » et « valeurs très élevées ».

Il s'agit donc d'une gamme de valeurs **calculées**, pour les sols de culture en Wallonie dans le cadre de ce projet. La gamme ne représente pas le potentiel maximal que l'indicateur pourrait atteindre sous conditions environnementales optimales. À l'avenir, ces gammes de valeurs seront susceptibles d'évoluer, si l'analyse des indicateurs est adoptée par des laboratoires provinciaux affiliés au réseau REQUASUD (cf. §5).

De plus, une comparaison entre les pratiques agricoles des sols (agriculture conventionnelle, de conservation et biologique) est située en dessous du graphique de chaque gamme de référence (figure 2). Ces données représentent le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quartile des valeurs **mesurées** de l'indicateur en 2016.

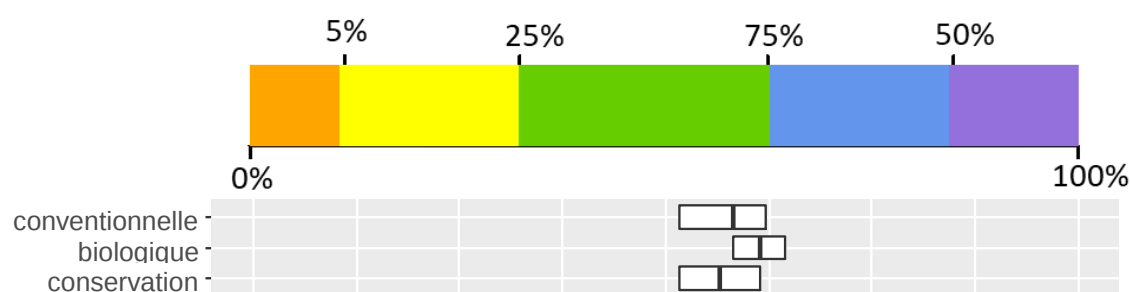


Figure 2 : Schéma général d'une gamme de référence et de la comparaison des pratiques agricoles. Ce graphique a été réalisé pour chaque indicateur.

La variabilité saisonnière est représentée par un pictogramme indiquant si les valeurs mesurées en avril, juin, août et octobre 2016 dans des sites sous gestion conventionnelle étaient significativement différentes entre elles. La saison avec les valeurs les plus élevées est représentée en vert, celle avec les valeurs les plus faibles en rouge, et des valeurs intermédiaires en orange. Les saisons avec des codes couleurs identiques (ou deux couleurs) ne sont pas significativement différentes.

Tableau 2 : Tableau général illustrant la variabilité saisonnière d'un indicateur dans des sols sous agriculture conventionnelle. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'.

			
avril	juin	août	octobre
			

Légende :  <  < 

4.1 Prélèvement, préparation et stockage des échantillons

La majorité des indicateurs chimiques et biologiques présentés dans cette brochure sont mesurés en laboratoire via l'analyse d'échantillons de sol.

Pour les indicateurs chimiques - ces indicateurs concernent le carbone organique total, la fraction grossière et la fraction fine du carbone organique du sol. Des échantillons composites sont prélevés sur la profondeur de 0-20 cm lorsque le sol est en culture et de 0-10 cm lorsqu'il est en prairie (profondeurs moyennes utilisées pour les avis de fumures). Le prélèvement s'est effectué de manière à intégrer le moins possible d'épaisseur transitionnelle entre l'horizon de surface et le sous-jacent. Le sol frais est séché à l'air libre (plusieurs jours) ou à l'étuve (maximum 40°C) puis tamisé à 2 mm. Dès lors, l'échantillon peut être conservé dans un contenant hermétique à température ambiante et à l'abri de la lumière avant les diverses analyses. Pour la mesure des fractions de carbone organique, environ 10 à 15 g est nécessaire pour les analyses en laboratoire. Il faut prévoir environ 120 g supplémentaires dans le cas d'une mesure via Spectrométrie Proche Infra-Rouge (SPIR).

Pour les indicateurs biologiques - ces indicateurs concernent le carbone et l'azote extraits à l'eau froide et chaude, la biomasse microbienne, le rapport Cmic/Nmic, le potentiel métabolique, la respiration potentielle, la minéralisation nette de l'azote, la densité des vers de terre et le quotient métabolique et microbien. L'échantillonnage pour l'analyse des indicateurs biologiques doit s'effectuer dans des conditions 'moyennes', c.à.d. lorsque le sol est ni trop sec, ni trop humide. Aussi l'échantillonnage ne s'effectuera pas en période de gel. Des échantillons composites sont prélevés sur la profondeur de 0-10 cm. Cette profondeur correspond à la couche ayant l'activité biologique la plus élevée. Pour la mesure de tous les indicateurs biologiques (sauf les vers de terre, prélevés sur le terrain), environ 300 g de sol frais sont nécessaires. Le sol frais est tamisé à 4 mm et, si nécessaire, l'humidité est ajustée à 50-60% de la capacité au champ (WHC : water holding capacity) (Priha et Smolander, 1999, modifié) avec de l'eau distillée ou en séchant le sol à 20°C. Dans ce cas, un dessèchement complet du sol doit être évité. L'ajustement de l'humidité est nécessaire pour les indicateurs

dont la mesure nécessite une incubation du sol (minéralisation nette de l'azote, respiration potentielle), car en dessous de 55-60% de la WHC les organismes souffrent de sécheresse et au-dessus de 80% WHC ils souffrent d'un manque d'oxygène. Les échantillons frais sont conservés à 4°C jusqu'aux analyses. Comme un stockage prolongé peut biaiser les résultats, il est conseillé d'effectuer les analyses dans les trois mois qui suivent l'échantillonnage (NF ISO 18512 (2007-10-01)). Un stockage des échantillons à long terme n'est pas possible.

La mesure de l'humidité se réalise après séchage à l'étuve à $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante. Une nuit, soit environ 15 heures, suffisent généralement (NF ISO 11 464). Pour mesurer l'humidité du sol, peser environ 10g de sol frais et faites-le sécher à l'étuve comme précisé précédemment. Ensuite, peser le sol sec. Le calcul de l'humidité est le suivant

Teneur en matière sèche (MS%)=(poids sec du sol/poids frais du sol) $\times$ 100%

Humidité (HUM%)=100-MS

La WHC peut être déterminée par une méthode volumétrique :

Mesurer le contenu en eau du sol (voir avant). Préparer des entonnoirs, attacher un tuyau en caoutchouc, et fermer avec un clip. Placer des portions de laine de verre de 0.30 g dans le fond des entonnoirs. Peser 50 g de sol dans chaque entonnoir. Préparer 3 entonnoirs sans sol (avec laine de verre). Ajouter 50 ml d'eau, et laisser reposer 30 minutes. On peut couvrir l'entonnoir avec un film plastique dans lequel on a percé de petits trous, afin d'éviter l'évapotranspiration. Ouvrir le clip, récolter l'eau dans un cylindre gradué et noter le volume.

Calculer :

- La quantité d'eau retenue par le sol :
 $A = 50 - (\text{volume d'eau retenue par la laine de verre} + \text{volume d'eau collectée}) \text{ (ml)}$
- La capacité au champs (WHC) (ml d'eau contenu à 100% de la WHC par 100 g de sol sec) : $B \text{ (ml)} = \text{WHC (ml par 100g de sol frais)} = 2A + \text{HUM\%}$
Puis : $C = \text{ml contenu par 100 g de sol sec à 100\% de la WHC} = (B \text{ ml/MS}) \times 100$
- La quantité d'eau retenue par 100 g de sol sec à 60% de la WHC
 $D = C/100 \times 60 \text{ (ml)}$

4.2 Carbone organique total du sol

Qu'est-ce que c'est ?

Le carbone organique total du sol (ou COT) constitue ~57% de la matière organique du sol. Le taux de COT est systématiquement mesuré par les laboratoires du réseau REQUASUD lors des analyses de terres agricoles.

Principe de mesure

Il existe différents principes chimiques pour mesurer le COT, et donc différentes méthodes. Dans le réseau REQUASUD, le COT est obtenu soit i/ par oxydation au bichromate de potassium (Walkley & Black, 1934 – ISO 14235-1998) ou ii/ par dosage du carbone total par analyse élémentaire par combustion sèche (Méthode Dumas – ISO 10694-1995) auquel est ensuite soustrait le dosage du carbone inorganique.

L'analyse par Spectroscopie Proche Infra-Rouge est également utilisée comme méthode de mesure indirecte du COT (Minet *et al.*, 2016; ISO 17184-2014).

Gammes de valeurs en Wallonie

La teneur en COT dépend de l'utilisation principale du sol (culture ou prairie) et du climat, du type de sol (notamment la texture et le drainage), ainsi que des grands types de pratiques agricoles appliqués (Goidts *et al.*, 2009a; Meersmans *et al.*, 2011; Chartin *et al.*, 2017). Les gammes de valeurs sont déterminées pour les cultures et les prairies, puis détaillées par région agricole, chacune présentant une relative homogénéité en termes de variabilité climatique, pédologique et de pratiques agricoles (figure 3).

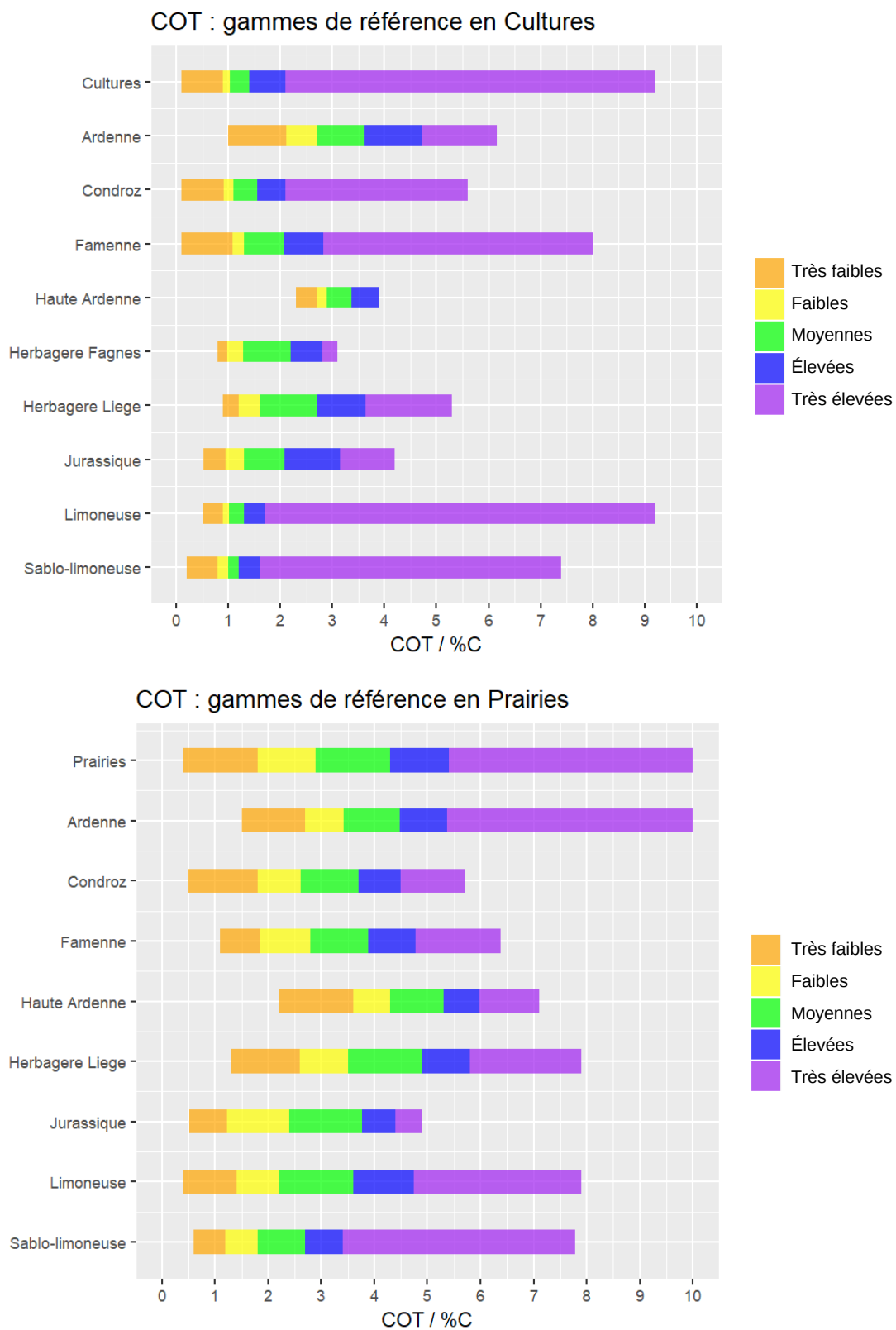


Figure 3 : Gammes de valeurs des teneurs en COT des sols (%C) sous cultures (en haut) et prairies (en bas) en Wallonie. Les gammes sont produites à partir de la base de données centralisée de REQUASUD (période 2004-

2014 ; licence n° A06/2017). Les couleurs montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (orange), 'faibles' (jaune), 'moyennes' (vert), 'élevée' (bleu) et 'très élevées' (violet).

Protocole de mesure

Le COT étant déjà mesuré en routine dans les laboratoires du réseau REQUASUD, le protocole de mesure n'est pas détaillé ici. Veuillez-vous référer au protocole de votre laboratoire d'intérêt.

Expression des résultats

Le taux de COT d'un échantillon de sol est exprimé en g / 100g de terre sèche ou en %C m.s. (matière sèche).

Interprétation

La teneur en COT donne une indication de la teneur en matière organique du sol (MOS); le COT représentant ~57% de la MOS. Ces dernières jouent un rôle central dans la qualité des sols et dans le maintien de leurs fonctions clés. Les matières organiques ont un rôle essentiel en tant que moteur de l'activité biologique dans les sols car elles constituent une source nutritive importante. Elles favorisent l'action des organismes vivants et ainsi la création d'un milieu structuré dont les pores permettent une meilleure circulation de l'air et de l'eau. Elles améliorent la stabilité de la structure du sol et favorisent la rétention de l'eau par leurs propriétés colloïdales. Les groupements fonctionnels des molécules organiques augmentent la capacité d'échange cationique et donc la rétention des éléments nutritifs et des polluants. Les matières organiques améliorent également la capacité de résistance du sol aux processus d'érosion.

En culture, une teneur en COT de 1.15%C (soit ~2% de MOS) est considérée comme le seuil minimum à respecter pour que le sol soit à même d'assurer ses principales fonctions agronomiques. En effet, en dessous de cette valeur de 1.15%C de COT, les agrégats deviennent instables (L Van-Camp *et al.*, 2004). À noter que Le Villio *et al.* (2001) fixent le seuil à 1,5 %C de COT.

En Wallonie, les sols sous cultures échantillonnés sur la période 2004 - 2014 présentaient une teneur moyenne en COT de 1,3 %C. La part de superficie wallonne cultivée concernée par des faibles teneurs en carbone, entraînant des risques de dégradation de la structure des sols était estimée pour cette période à 22 %. Par rapport à la période 1949 - 1972, la teneur moyenne en COT des sols sous cultures en Wallonie a baissé de 20% (de 1,63%C à 1,3%C), tandis que la superficie de sols carencés a presque triplé. Les sols sous prairies présentaient quant à eux une teneur moyenne en COT de 3,6 %C sur la période 2004 - 2014, teneur globalement en hausse (+ 11 %) par rapport à la période 1949 - 1972, malgré des disparités entre régions agricoles (rapport sur l'état de l'environnement wallon; DGO3, 2017).

4.3 Fraction grossière de carbone organique du sol

Qu'est-ce que c'est ?

La fraction grossière de carbone organique correspond à la teneur en carbone organique du mélange de micro-agrégats, de petits macro-agrégats et de matière organique particulaire (MOP) de diamètre $> 20\mu\text{m}$. La teneur en MOP est relativement faible dans les sols agricoles, inférieur à 10% du COT (Wiesmeier *et al.*, 2014). La fraction grossière contient majoritairement du carbone organique labile, disponible pour les micro-organismes, et une proportion moindre de C stabilisé dans les micro-agrégats.

Principe de mesure

Un échantillon de sol est fractionné physiquement par tamisage humide à $20\mu\text{m}$. La teneur en carbone organique de la fraction grossière $> 20\mu\text{m}$, recueillie sur le tamis, est calculée à partir des mesures du carbone organique total (COT ; § 4.2) et du carbone dans la fraction fine de ($C < 20\mu\text{m}$; § 4.4) -

$$C > 20\mu\text{m} = \text{COT} - C < 20\mu\text{m}$$

L'analyse par Spectroscopie Proche Infra-Rouge est également envisageable comme méthode de mesure indirecte de la fraction grossière de carbone organique du sol.

Gammes de valeurs en Wallonie

Teneur en fraction grossière de carbone des sols sous cultures

(%C), n= 211



Teneur en fraction grossière de carbone des sols sous prairies

(%C), n= 119



Figure 4 : Gammes de valeurs de la fraction grossière de carbone organique des sols (%C) sous cultures (en haut) et prairies (en bas) en Wallonie (agriculture conventionnelle). Les couleurs montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (orange), 'faibles' (jaune), 'moyennes' (vert), 'élevées' (bleu) et très élevées (violet).

Variabilité saisonnière :

Les mesures effectuées au cours du projet CARBIOSOL et la variabilité spatiale de cette fraction n'ont pas permis de mettre en avant des tendances selon les saisons.

Protocole de mesure

Matériel, appareillage, réactifs

- Balance d'une exactitude minimum de 0,1 g (min.)
- Une table d'agitation
- Une centrifugeuse pouvant gérer un volume supérieur à 1.5L (pas obligatoire)
- Une étuve
- Un analyseur carbone
- 1 bouteille hermétique de 250mL minimum pour agitation
- 1 tamis de maille de 50µm* (Ø 10cm est le plus pratique).
- 1 tamis de maille de 20µm (Ø 10cm est le plus pratique)
- 3 béchers de 2L
- 1 entonnoir adaptable sur un bécher de 2L pouvant accueillir un tamis de Ø 10cm
- 1 pissette
- 1 vaporisateur
- Eau distillée (2.5L minimum)
- 2 petites barquettes résistantes à la chaleur
- 1 barquette résistante à la chaleur de grande contenance (2L min. si vous ne disposez pas de centrifugeuse)

* L'échantillon est d'abord tamisé à 50µm afin de faciliter le tamisage ensuite à 20µm et éviter l'encombrement rapide du tamis.

Mode opératoire

ATTENTION - Avant toute manipulation, s'assurer que l'ensemble de la vaisselle, barquettes et outils ont été bien rincés à l'eau déminéralisée et séchés !!

Agiter pendant 15 min à 250 rpm, 10g d'échantillon de sol dans 100mL d'eau désionisée. Déverser la totalité du mélange sur le tamis de 50µm superposé à un entonnoir et un bécher de 2 L.

Tamiser le contenu du tamis à l'aide d'une pissette d'eau désionisée. Si l'eau s'écoule mal, utiliser **avec parcimonie** un vaporisateur d'eau désionisée. Une fois que l'écoulement est clair, arrêter le tamisage. Recueillir le refus de tamis dans une barquette préalablement étiquetée et pesée, et mettre à l'étuve à 60°C.

Répéter l'opération ci-dessus afin de tamiser à 20µm le filtrat que vous venez d'obtenir au premier tamisage*. **ATTENTION** - deux autres béciers de 2 L pourront être nécessaires pour recevoir l'ensemble du filtrat à 20µm. Le filtrat final (eau + particules <20µm) ne devrait pas représenter plus de 2 L. Recueillir le refus de tamis dans une barquette préalablement étiquetée et pesée, et mettre à l'étuve à 60 °C.

**Une astuce - agiter le contenu du premier bécier, laisser le décanter quelques minutes et verser petit à petit sur le tamis de 20µm.*

Centrifuger le filtrat à 20µm 25 minutes à 3600 rpm et évacuer le maximum d'eau. Si vous n'avez pas de centrifugeuse, verser directement le filtrat dans la grande barquette préalablement étiquetée et pesée, et mettre à l'étuve à 60°C.

Après séchage complet, peser les 3 barquettes, récupérer le contenu de chacune dans des contenants adaptés (type petites coupelles plastiques avec couvercles) et les entreposer au sec. **ATTENTION** - Vérifier que la masse totale des particules contenues dans les 3 barquettes correspond au moins à 95% du poids de départ de l'échantillon fractionné.

Analyser la teneur en carbone organique ($c_{<20}$; Norme ISO 10694) de la fraction 0-20µm (les autres peuvent être analysées pour information complémentaire), et rapporter cette teneur à la masse totale de l'échantillon, i.e. -

$$C_{<20\mu m} = c_{<20} \cdot p_{<20}$$

Avec $c_{<20}$ la teneur en carbone mesurée dans la fraction 0-20µm, et $p_{<20}$ la proportion massique en particules < à 20µm dans l'échantillon total de sol (chiffre allant de 0 à 1). Analyser la teneur en COT de l'échantillon total, et en déduire la teneur en $C_{>20\mu m}$ par soustraction de $C_{<20\mu m}$.

ATTENTION - Ne pas oublier de tester l'échantillon de sol à l'HCl (5 ou 10%). En cas d'effervescence, mesure le carbone inorganique sur l'échantillon total et sur la fraction 0-20µm, et corriger les concentrations en conséquence.

Expression des résultats

Le taux de carbone de la fraction grossière d'un échantillon de sol, i.e. $C_{>20\mu m}$, est exprimé en g / 100g de terre sèche ou en %C m.s.

Remarques méthodologiques

Ces dernières années, de nombreuses méthodologies de fractionnement ont été développées (<https://www.somfractionation.org/>). Cette méthodologie est une version modifiée d'une méthode de fractionnement physique type 'aggregate size fractionation' de Six *et al.* (1999) ; ici les micro-agrégats ne sont pas détruits par l'analyse.

Interprétation et conseils

La fraction grossière, $C > 20\mu\text{m}$, contient le carbone organique labile du sol. Il est composé de débris de plantes, incluant les résidus frais de cultures et des racines entre 0.02 et 2mm de diamètre, d'organismes vivants et des restes d'organismes morts. Cette fraction labile se décompose relativement rapidement, c'est-à-dire de quelques jours à quelques années. C'est une source d'énergie facilement assimilable par les organismes - on observe d'ailleurs en Wallonie que la variabilité de la fraction grossière de carbone est corrélée au carbone et à l'azote microbien, ainsi qu'à la respiration potentielle (van Wesemael *et al.*, 2019). La fraction grossière de carbone est donc directement liée à l'amélioration de la qualité biologique du sol. Cette fraction favorise également la formation d'agrégats du sol, améliorant ainsi la structure du sol pour une meilleure infiltration et rétention de l'eau.

L'étude du carbone et de ses fractions sur des essais à long terme (CRA-w) et des parcelles chez des agriculteurs volontaires a montré que la fraction grossière de carbone organique ($C > 20\mu\text{m}$) est plus sensible que la fraction stable, et que le COT, aux changements de managements. En effet, un changement significatif peut être ressenti dans la fraction grossière en ~ 5 ans, alors que parfois plus de 10ans sont nécessaires pour détecter ce changement via le COT (van Wesemael *et al.*, 2019). De plus, le maintien d'une proportion de fraction grossière par rapport à la fraction fine ($C > 20\mu\text{m} / C < 20\mu\text{m}$) de ~ 0.5 -1 assure le maintien du niveau de COT dans le sol (Fig. 5). Au-dessus de ces valeurs de rapport, la teneur en COT de la parcelle augmentera significativement dans les années à venir, alors qu'elle baissera significativement dans le cas contraire.

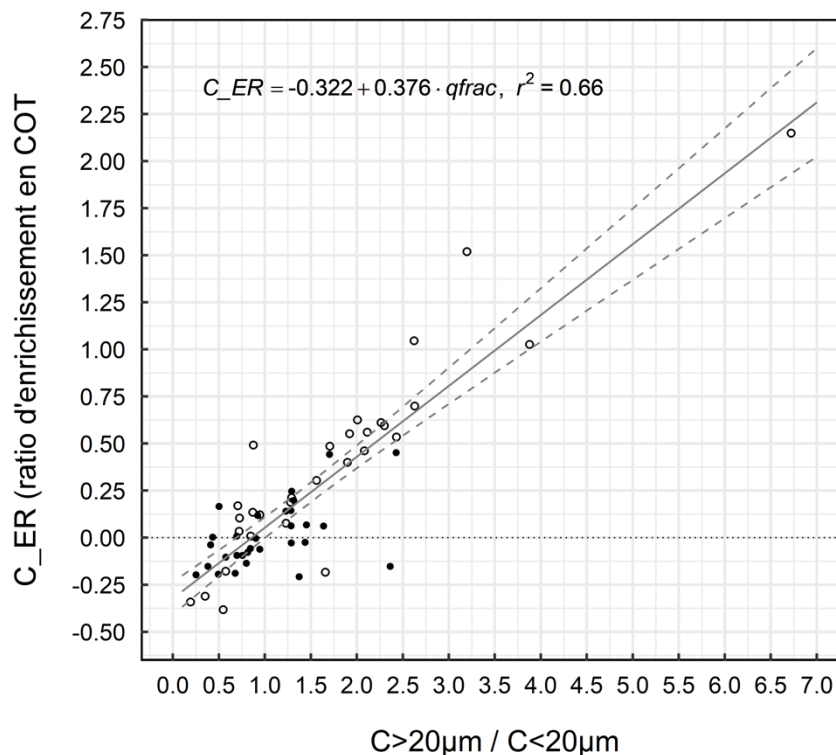


Figure 5 : Relation entre le ratio d'enrichissement en COT (2005-2015) et le rapport $C > 20\mu\text{m}$ / $C < 20\mu\text{m}$ pour les sols agricoles en Wallonie (Cercles noirs pleins - sols sous cultures; cercles noirs - sols sous prairies'). Pour exemple, un ratio d'enrichissement de 0.1 signifie que la teneur en COT d'un sol mesurée en 2015 est 10% plus élevée relativement à la teneur mesurée en 2005. Adaptée de van Wesemael *et al.* (2019).

La fraction grossière $C > 20\mu\text{m}$ est donc cruciale pour le maintien et la restauration des niveaux de carbone organique dans les sols agricoles car - i/ elle est la fraction la plus réactive d'un point de vue biologique ; ii/ à long terme elle permet d'alimenter la fraction fine ($C < 20\mu\text{m}$; §4.4) assurant ainsi le stockage de carbone stable ; et iii/ cette fraction reflète l'effet intégré des pratiques culturales sur les 10 dernières années et plus encore (van Wesemael *et al.*, 2019).

4.4 Fraction fine de carbone organique du sol

Qu'est-ce que c'est ?

La fraction fine de carbone organique correspond à la teneur en carbone organique des particules libres des fractions texturales d'argiles et de limons fins et des micro-agrégats inférieurs à 20µm de diamètre. Le carbone organique y est stable sous forme de complexes organo-minéraux (Hassink, 1997; Six *et al.*, 2002; Feng *et al.*, 2013).

Principe de mesure

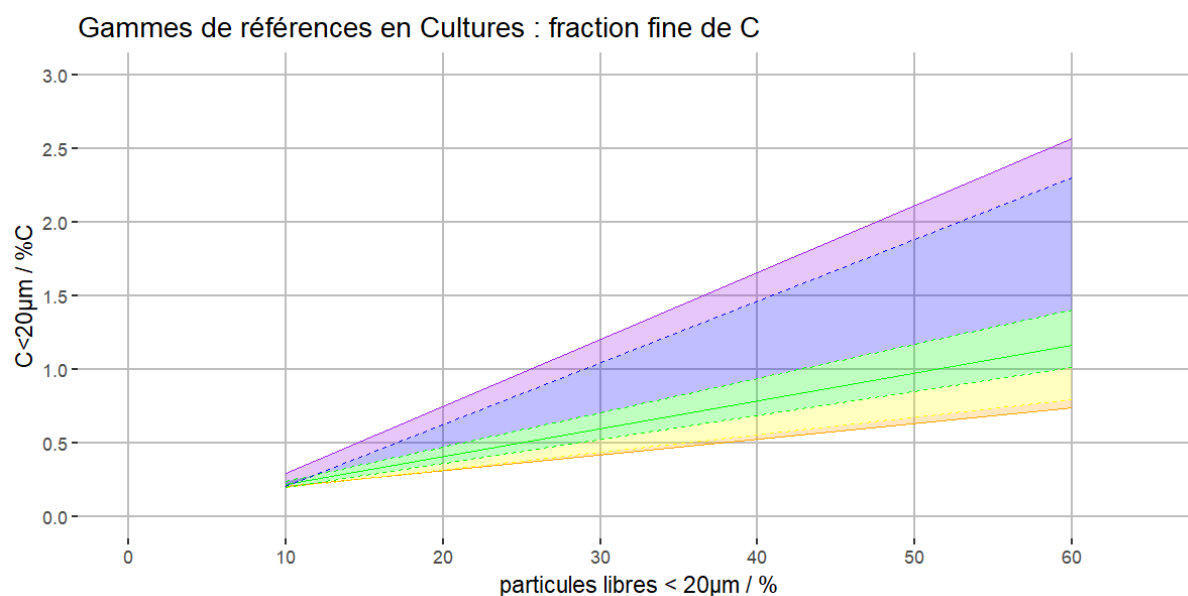
Un échantillon de sol est fractionné physiquement par tamisage humide à 20 µm. La teneur en carbone organique de la fraction < 20 µm est mesurée selon le même protocole que celui du COT (§ 6.2). La teneur mesurée dans la fraction < 20µm est ensuite ramenée à une teneur par rapport au COT, telle que -

$$COT = C < 20\mu m + C > 20\mu m$$

L'analyse par Spectroscopie Proche Infra-Rouge est également envisageable comme méthode de mesure indirecte de la fraction fine de carbone organique du sol.

Gammes de valeurs en Wallonie

La fraction fine $C < 20\mu m$ dépend de l'utilisation principale du sol sur les dernières décennies (cultures, prairies, forêts, etc...) et de sa texture, notamment des argiles et limons fins (rapport CARBIOSOL 4 – Krüger *et al.*, 2018). Les gammes de valeurs pour $C < 20\mu m$ sont donc déterminées, par occupation de sols, dépendamment des teneurs en particules libres < 20µm mesurées en laboratoires.



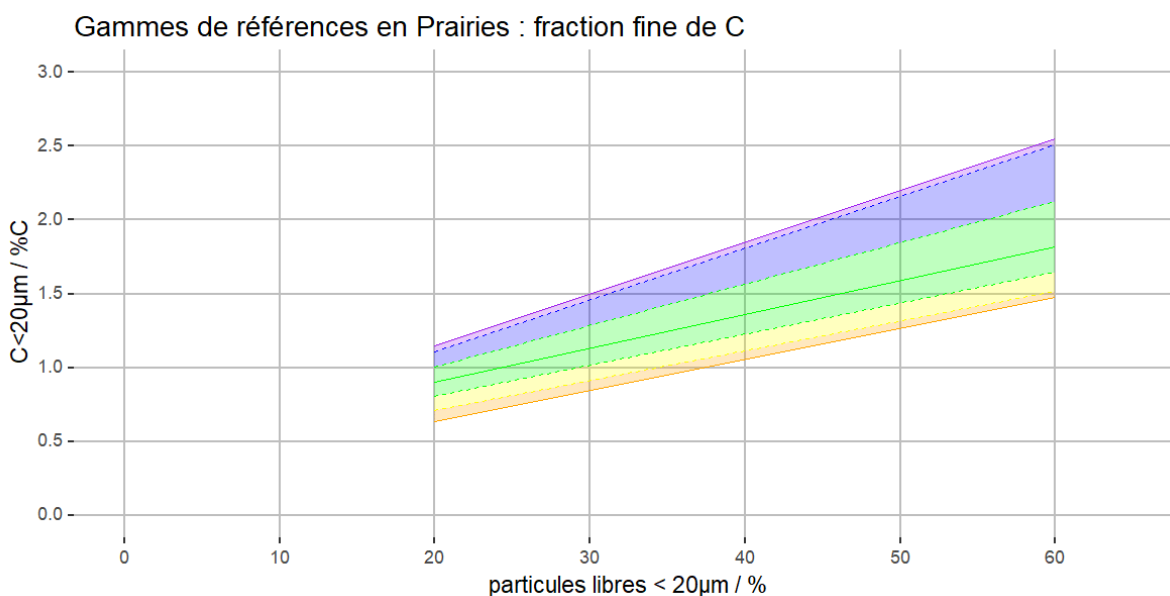


Figure 6 : Gammes de valeurs de la fraction fine de carbone organique des sols sous cultures (en haut) et prairies (en bas) en Wallonie (agriculture conventionnelle). Les aplats de couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (orange), 'faibles' (jaune), 'moyennes' (vert), 'élevées' (bleu) et très élevées (violet).

Variabilité saisonnière :

Tableau 3 : Variabilité saisonnière de la fraction fine de carbone organique des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'. Ici, aucune différence significative n'est observée.

			
avril	juin	août	octobre

Légende :  <  < 

Protocole de mesure

Matériel, appareillage, réactifs

Voire §4.3 'la fraction grossière de carbone organique'.

Mode opératoire

Voire §4.3 'la fraction grossière de carbone organique'.

Expression des résultats

Le taux de carbone de la fraction fine d'un échantillon de sol, i.e. $C < 20\mu\text{m}$, est exprimé en g / 100g de terre sèche ou en %C m.s.

Remarques méthodologiques

Voire §4.3 'la fraction grossière de carbone organique'.

Interprétation et conseils

La fraction fine de carbone organique ($C < 20\mu\text{m}$) est considérée comme la fraction de carbone organique stable du sol. Cette fraction organique de très petite taille se compose de matières organiques stabilisées chimiquement en association à des minéraux d'argile et/ou physiquement au sein de micro-agrégats, et des matières organiques récalcitrantes (humus). Le carbone contenu dans cette fraction est plus difficilement décomposable, de quelques années à siècles, et il a donc moins d'impact sur la fertilité du sol que la fraction grossière $C > 20\mu\text{m}$. Une des fonctions importantes de la fraction stable est sa capacité d'adsorption et de rétention de nutriments sous formes bio-disponibles. De plus, la présence de matières organiques stables de type 'humus' favorise le stockage d'eau et la séquestration de carbone.

La fraction fine de carbone d'un sol dépend de sa texture, les particules $< 20\mu\text{m}$ notamment. De ce fait, chaque sol possède une capacité maximale de stockage de C stable. La stabilisation de carbone ne peut s'effectuer que par un apport régulier et suffisamment conséquent en MO fraîches sur une période supérieure à ~10ans et plus (van Wesemael *et al.*, 2019). En effet, la proportion de carbone organique labile ($C > 20\mu\text{m}$) issue de ces MO fraîches qui n'aura pas été minéralisée via l'activité des microorganismes pourra, à terme, via différentes réactions physico-chimiques être stabilisée dans la fraction de $C < 20\mu\text{m}$. Comme les apports en MO fraîches sont plus importants et réguliers en prairies, leurs sols sont plus à même d'arriver à saturation en carbone stable ($C < 20\mu\text{m}$) qu'un sol de cultures - ceci explique les différences observées entre les gammes de valeurs proposées dans cette fiche plus haut.

4.5 Carbone extrait à l'eau froide et à l'eau chaude

Qu'est-ce que c'est ?

Le carbone extrait à l'eau froide représente le carbone organique soluble dans l'eau à température ambiante. Le carbone extrait à l'eau chaude présente carbone organique soluble dans un extrait chauffé pendant 16H à 80°C.

Principe de mesure

L'extraction consécutive d'un échantillon de sol avec de l'eau froide (20°C) et de l'eau chaude (80°C) permet la mesure de deux propriétés du sol liées au cycle de carbone.

Gammes de valeurs en Wallonie

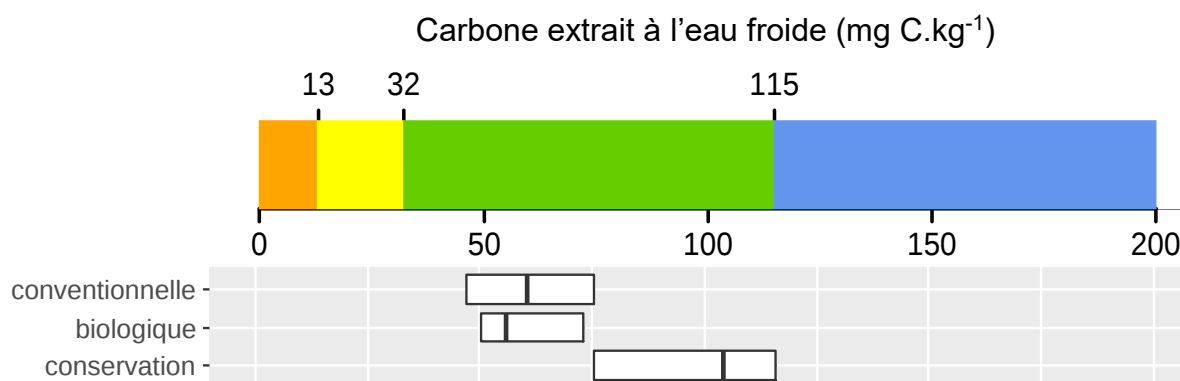


Figure 7 : Gammes de valeurs calculées du carbone extrait à l'eau froide (mg C.kg⁻¹) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation.

Variabilité saisonnière :

Tableau 4 : Variabilité saisonnière du carbone extrait à l'eau froide des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'.

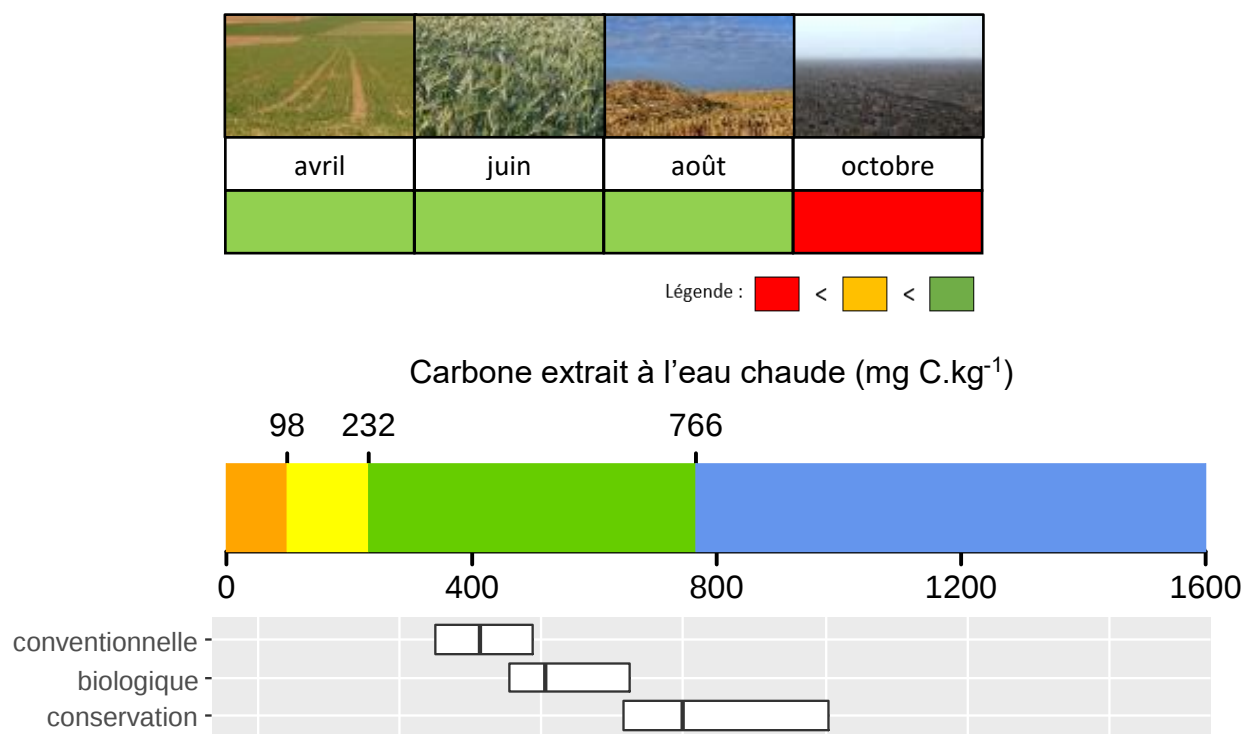
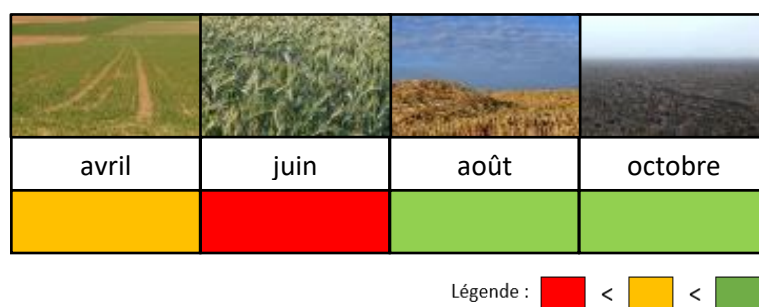


Figure 8 : Gammes de valeurs calculées du carbone extrait à l'eau chaude (mg C.kg⁻¹) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation.

Variabilité saisonnière :

Tableau 5 : Variabilité saisonnière du carbone extrait à l'eau chaude des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'.



Protocole de mesure

Matériel, appareillage, réactifs

- Balance d’une exactitude de minimum 0,1 g
- Centrifugeuse et tubes à centrifuger de 250 ml
- Pompe à vide
- Système de filtration en verre borosilicaté
- Filtre plat (45 µm)
- Four ou bain-marie à température constante (80°C)
- Agitateur horizontal
- Tubes en verre
- Eau distillée
- Analyseur de TOC (pour liquides)
- Acide phosphorique (85%)

Mode opératoire

Peser 10 g de sol frais dans un tube à centrifuger de 250 ml. Ajouter 60 ml d’eau distillée et placer le tube sur un agitateur horizontal (120 rpm) pendant 30 minutes. Centrifuger les échantillons à 3000 rpm pendant 10 minutes. Filtrer le surnageant à travers un filtre de 45 µm, garder le tube. La concentration de carbone extrait à l’eau froide est mesurée dans le surnageant à l’aide de l’analyseur TOC.

Ajouter 60 ml d’eau distillée dans le tube avec le sol restant et le placer sur un agitateur horizontal pendant 30 minutes afin de mélanger l’eau distillée avec le précipité. Placer le tube dans une étuve préchauffée à 80°C pour 16 heures. Placer le tube sur un agitateur horizontal pendant 30 minutes. Centrifuger les échantillons à 3000 rpm pendant 10 minutes. Filtrer le surnageant à travers un filtre de 45 µm. La concentration de carbone extrait à l’eau chaude est mesurée dans le surnageant à l’aide de l’analyseur TOC.

Expression des résultats

Le carbone extrait à l’eau froide/chaude est exprimé en milligramme de carbone par kilogramme de sol sec (voir dernier paragraphe de la partie 4.1).

Remarques méthodologiques

Pour la conservation des échantillons avant analyse et enlever le carbone inorganique, il convient d’acidifier les échantillons avec de l’acide phosphorique (selon le mode opératoire de l’appareil utilisé).

Cette mesure présente l’avantage qu’un seul sous-échantillon de sol est nécessaire pour la mesure de carbone extrait à l’eau froide et à l’eau chaude contre deux (non-fumigé et fumigé)

sous-échantillons nécessaires pour mesurer la biomasse microbienne (carbone microbien, voir ci-dessous).

Le carbone et l'azote extrait à l'eau froide et à l'eau chaude peuvent être mesurés sur les mêmes extraits.

Dans la littérature scientifique, le carbone extrait à l'eau froide est généralement appelé « carbone soluble » et le carbone extrait à l'eau chaude « carbone labile ». Le terme « carbone labile » est utilisé pour différentes fractions dont le temps de renouvellement et la disponibilité microbienne diffèrent. L'utilisation du terme « carbone extrait à l'eau chaude » peut éviter des malentendus.

Interprétation et conseils

Le carbone extrait à l'eau froide représente le carbone accessible aux micro-organismes et par conséquent, leur source d'énergie principale (Haynes, 2000). Cette mesure s'approche du carbone organique dissous, mesuré dans l'eau du sol.

Le carbone extrait à l'eau chaude a été proposé comme approximation pour la biomasse microbienne (Sparling, 1998), c.à.d la quantité de micro-organismes présents dans le sol. L'incubation du sol à 80°C en anaérobiose cause une lyse des cellules et la libération du carbone des cellules microbiennes. Cette fraction de carbone contient également des composés organiques d'origine non microbienne. Elle représente une réserve accessible de nutriments et d'énergie pour les plantes et les micro-organismes. Les valeurs du carbone extrait à l'eau chaude sont en moyenne 40% plus élevées que le carbone microbien.

L'application d'un amendement organique augmente les teneurs en carbone extrait à l'eau chaude et à l'eau froide (Lavaud, 2010). Par contre, l'application d'un amendement azoté diminue légèrement les teneurs en carbone extrait à l'eau chaude, ce qui n'est pas le cas d'un amendement phosphaté (Anwar *et al.*, 2002).

4.6 Azote extrait à l'eau froide et l'eau chaude

Qu'est-ce que c'est ?

L'azote extrait à l'eau froide représente l'azote organique et minéral soluble dans l'eau à température ambiante. L'azote extrait à l'eau chaude présente l'azote organique et minéral soluble dans un extrait chauffé pendant 16 h à 80°C. L'azote extrait à l'eau chaude mesure la quantité d'azote potentiellement disponible pour les plantes (Braos *et al.*, 2016).

Principe de mesure

L'extraction consécutive d'un échantillon de sol avec de l'eau froide (20°C) et de l'eau chaude (80°C) permet la mesure de fractions d'azote disponibles pour les micro-organismes.

Gammes de valeurs en Wallonie

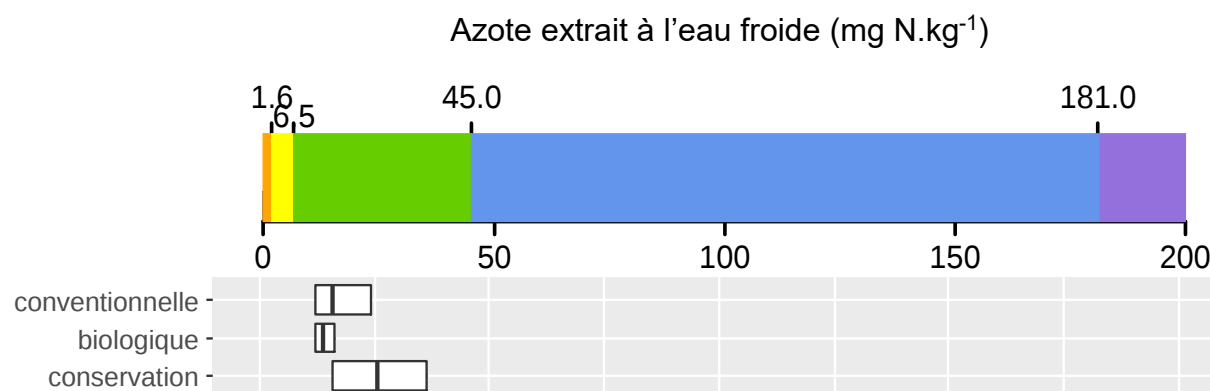


Figure 9 : Gammes de valeurs calculées de l'azote extrait à l'eau froide (mg N.kg⁻¹) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) 'élevées' (droite, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quartile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation.

Variabilité saisonnière :

Tableau 6 : Variabilité saisonnière de l'azote extrait à l'eau froide des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'.

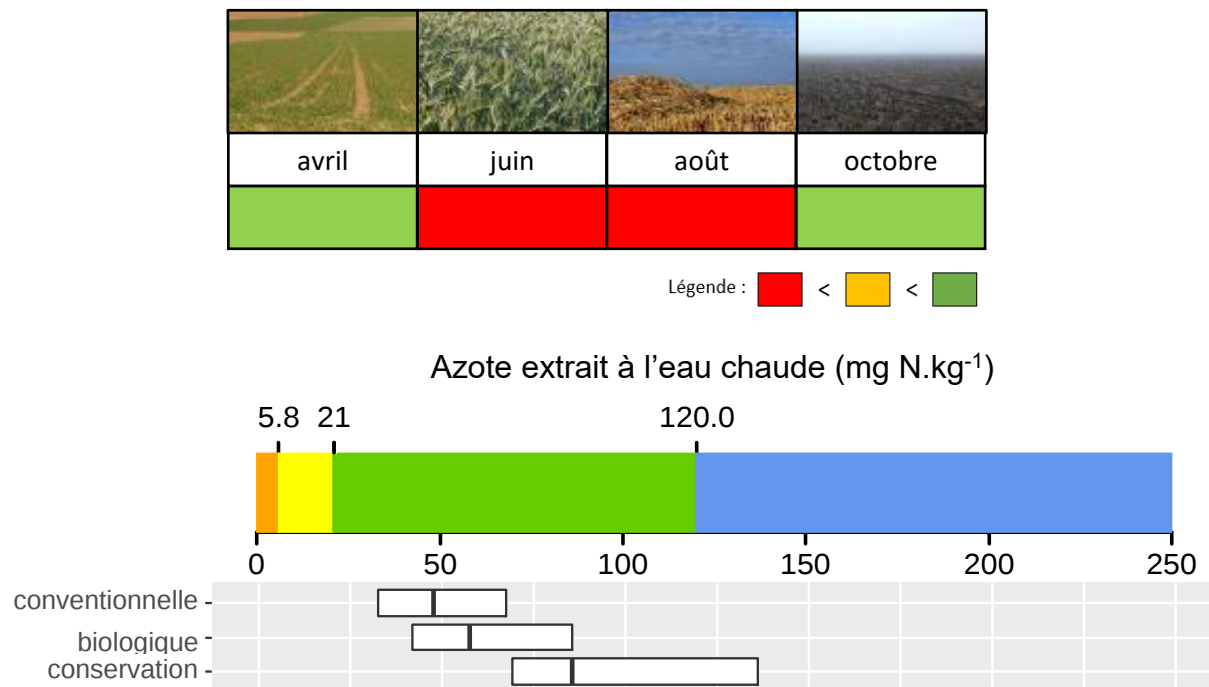


Figure 10 : Gammes de valeurs calculées de l'azote extrait à l'eau chaude dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation.

Variabilité saisonnière :

Tableau 7 : Variabilité saisonnière de l'azote extrait à l'eau chaude des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'noir' est significativement plus faible que 'rouge' qui est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'.



Protocole de mesure

Matériel, appareillage, réactifs

- Balance d'une exactitude de minimum 0,1 g
- Centrifugeuse et tube à centrifuger de 250 ml
- Pompe à vide
- Système de filtration en verre borosilicaté
- Filtre plat (45 µm)
- Four ou bain-marie à température constante (80°C)
- Agitateur horizontal
- Fioles en PE
- Congélateur
- Eau distillée
- Dispositif et réactifs pour l'analyse de l'azote total (pour liquides)

Mode opératoire

Peser 10 g de sol frais dans un tube à centrifuger de 250 ml. Ajouter 60 ml d'eau distillée et placer le tube sur un agitateur horizontal (120 rpm) pendant 30 minutes. Centrifuger les échantillons à 3000 rpm pendant 10 minutes. Filtrer le surnageant à travers un filtre de 45 µm. La concentration d'azote extrait à l'eau froide (azote total) est mesurée dans le surnageant. En complément, le contenu en azote minéral peut aussi être mesuré séparément.

Si les concentrations d'azote dans l'extrait ne peuvent pas être mesurées immédiatement, transvaser le surnageant dans des fioles en PE et les congeler jusqu'à l'analyse.

Ajouter 60 ml d'eau distillée dans le tube avec le sol restant et le placer sur un agitateur horizontal pendant 30 minutes afin de mélanger l'eau distillée avec le précipité. Placer le tube dans une étuve préchauffée à 80°C pour 16 heures. Placer le tube sur un agitateur horizontal pendant 30 minutes. Centrifuger les échantillons à 3000 rpm pour 10 minutes. Filtrer le surnageant à travers un filtre de 45 µm. La concentration d'azote extrait à l'eau chaude (azote total) est mesurée dans le surnageant. En complément, le contenu en azote minéral peut aussi être mesuré séparément.

Expression des résultats

L'azote (organique) extrait à l'eau froide/chaude est exprimé en milligramme d'azote par kilogramme de sol sec (voir dernier paragraphe de la partie 4.1).

Remarques méthodologiques

Cette mesure présente l'avantage qu'un seul sous-échantillon de sol est nécessaire pour la mesure de l'azote extrait à l'eau froide et l'azote extrait à l'eau chaude contre deux (non-fumigé et fumigé) sous-échantillons nécessaires pour mesurer l'azote microbien (voir ci-dessous).

Le carbone et l'azote extrait à l'eau froide et à l'eau chaude peuvent être mesurés sur les mêmes extraits.

NB - Le rapport C/N

Le carbone et l'azote extrait à l'eau chaude sont positivement corrélés. Le rapport C/N de l'extrait à l'eau chaude est de 8,5 en moyenne. Le rapport C/N de l'extrait à l'eau froide est plus variable. En moyenne, le rapport C/N de l'extrait à l'eau froide est de 5,3.

Interprétation et conseils -

L'azote extrait à l'eau froide et l'azote à l'eau chaude présentent des mesures de l'azote dans les fractions actives du sol. Elles peuvent donner des informations sur la quantité d'azote disponible pour les micro-organismes et elles offrent des informations complémentaires sur la minéralisation nette de l'azote. L'azote extrait à l'eau chaude est fortement lié à l'azote microbien et **permet d'estimer la fraction de l'azote organique disponible (Ghani *et al.*, 2003).**

4.7 La biomasse microbienne (carbone microbien) et l'azote microbien

Qu'est-ce que c'est ?

La biomasse microbienne (carbone microbien) est la composante vivante de la matière organique à l'exclusion des macro-organismes et des racines (Jenkinson et Ladd, 1981). Elle est surtout constituée de bactéries et de champignons, mais il y a également des protozoaires et des algues. Elle est exprimée en carbone microbien, et obtenue par fumigation au chloroforme. Les cellules microbiennes du sol éclatent lors de l'exposition au chloroforme et le carbone des cellules ainsi libéré est extrait. Le carbone microbien est calculé à partir de la différence entre le carbone organique d'un sol fumigé et celui du même sol non-fumigé. De la même façon, on peut estimer le contenu en azote des cellules microbiennes (azote microbien).

Gammes de valeurs en Wallonie

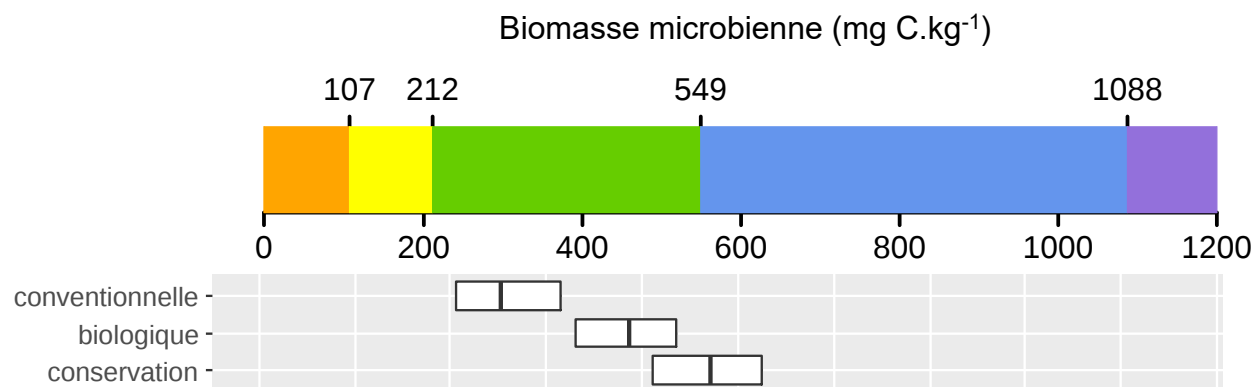


Figure 11 : Gammes de valeurs calculées de la biomasse microbienne (mg C.kg⁻¹) dans les sols en culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert), 'élevées' (droite, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quartile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation.

Variabilité saisonnière :

Tableau 8 : Variabilité saisonnière de la biomasse microbienne des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'. Ici, aucune différence significative n'est observée.

			
avril	juin	août	octobre
			

Légende :  <  < 

Protocole de mesure*Matériel, appareillage, réactifs*

- Berlins (50 ml)
- Erlenmeyers (250 ml)
- Entonnoir
- Filtres (Whatman 42)
- Tube en verre
- Dessiccateur
- Hotte d'extraction et masque à gaz pour travail avec chloroforme
- Agitateur horizontal
- Analyseur de TOC (pour liquides)
- Chloroforme sans éthanol
- K_2SO_4 (0,5 M)
- Acide phosphorique (85%)
- Dispositif et réactifs pour l'analyse de l'azote total (pour liquides)

Mode opératoire

20 g de sol frais sont pesés dans un erlenmeyer. Ajouter 100 ml de K_2SO_4 et agiter pendant une heure sur un agitateur horizontal à **180 rpm**. Filtrer le surnageant et transvaser une aliquote dans un tube en plastique. Garder les échantillons au réfrigérateur jusqu'à l'analyse avec un analyseur TOC. Pour la conservation des échantillons avant analyse et pour enlever le carbone inorganique, il convient d'acidifier les échantillons avec de l'acide phosphorique (selon le mode opératoire de l'appareil utilisé).

Peser un deuxième échantillon de 20 g de sol frais dans un berlin. Placer le berlin dans un dessiccateur. Placer un papier essuie-tout mouillé dans le fond du dessiccateur et un berlin avec des pierres de zéolithes et 50 ml de chloroforme au milieu du dessiccateur. Enlever l'air du dessiccateur pendant quelques minutes (pompe à vide ou trompe à eau), puis faites entrer doucement de l'air. Répéter cette opération trois fois, en rajoutant quelques pierres de zéolithes entre chaque purge. Incuber le sol dans le dessiccateur sous dépression en présence de chloroforme dans le noir pendant 72 heures. Évacuer le gaz du dessiccateur jusqu'à ce que tout le chloroforme soit purgé (au moins sept fois). Transvaser les échantillons de sol fumigé dans des erlenmeyers. Extraire les échantillons de manière identique aux échantillons non-fumigés.

La concentration de carbone dans les extraits est mesurée à l'aide de l'analyseur TOC.

Le carbone libéré lors de la fumigation est calculé en faisant la différence entre carbone extrait dans les échantillons fumigés et non-fumigés. Le carbone libéré est converti en carbone microbien (Cmic) en divisant par un facteur de conversion de 0,45 (Joergensen, 1996).

Si la concentration en azote total des extraits n'est pas mesurée immédiatement, transvaser un aliquote dans un flacon en PE et congeler l'échantillon jusqu'aux analyses. L'azote libéré est converti en azote microbien (Nmic) en le divisant par un facteur de conversion de 0,54 (Joergensen et Mueller, 1995).

Expression des résultats

Le carbone microbien est exprimé en milligramme de carbone par kilogramme de sol sec.

Remarques méthodologiques

La méthode présentée propose une période d'incubation plus longue (72 heures contre 24 heures) que dans la norme ISO14240-2 pour garantir une fumigation entière de la biomasse microbienne. Vu la concentration en sel élevée des extraits, il convient de les diluer (au moins 3 fois) avant analyse. Jenkinson *et al.* (2004) mentionnent la possibilité d'utiliser une concentration en K₂SO₄ inférieure à 0.5 M, ce qui pourrait être appliqué après des tests adéquats. L'humidité du sol doit être au minimum à 30% de la WHC, afin d'assurer une diffusion adéquate du chloroforme dans le sol et une fumigation efficace (ISO 14240-2: 1997).

Interprétation et conseils -

Les micro-organismes du sol sont les acteurs essentiels de la décomposition de la matière organique. Ainsi, la biomasse microbienne renseigne sur de nombreuses fonctions du sol et notamment sur les cycles du carbone, de l'azote et des autres nutriments (Dalal, 1998). Cette biomasse microbienne peut être à la fois source et puits de nutriments. Elle joue un rôle dans la formation de micro-agrégats, et elle est donc essentielle pour l'aération et la dynamique de l'eau dans le sol (Robert et Chenu, 1992).

La biomasse microbienne dépend de la quantité et de la qualité des substrats organiques (Smith et Paul, 1990). De ce fait, elle constitue un indicateur précoce des changements de la disponibilité de substrats.

La biomasse microbienne reflète la quantité et l'activité des micro-organismes présents dans le sol. Ainsi, une biomasse microbienne faible est généralement associée à une faible activité de décomposition. Un amendement organique peut augmenter la biomasse microbienne (Lechevallier *et al.*, 2004). Par exemple, un travail du sol type labour diminue la biomasse microbienne (Mangalassery *et al.*, 2015).

Pour augmenter la quantité de biomasse microbienne, il est conseillé de -

- réaliser des apports de matières organiques assimilables par les micro-organismes, comme des engrais verts, fumier, paille, matières animales ou engrais organiques, afin d'améliorer les réserves énergétiques et fournir un substrat aux micro-organismes ;
- décompacter, limiter le labour et préférer les techniques simplifiées de préparation de sol, drainer, chauler, apporter des amendements organiques (structurant du sol), *etc.*, afin d'améliorer l'état physique ;
- augmenter le pH si nécessaire, limiter l'usage du cuivre et des pesticides afin d'améliorer l'état chimique (Lechevallier *et al.*, 2004).

Les facteurs édaphiques de variation de la biomasse microbienne sont la température, l'humidité, les réserves en matières organiques, particulièrement les matières organiques facilement dégradables, l'environnement physique (structure et porosité) et chimique (CEC, pH, calcium) (Lechevallier *et al.*, 2004).

4.8 Rapport C_{mic}/N_{mic}

Qu'est-ce que c'est ?

Le rapport entre le carbone microbien et l'azote microbien (C_{mic}/N_{mic}) donne des informations sur la composition relative de la communauté microbienne en bactéries et en champignons.

Principe de mesure

Le rapport C_{mic}/N_{mic} est calculé à base des mesures de carbone microbien et d'azote microbien obtenues par fumigation-extraction (voir carbone et azote microbien).

Gammes de valeurs en Wallonie

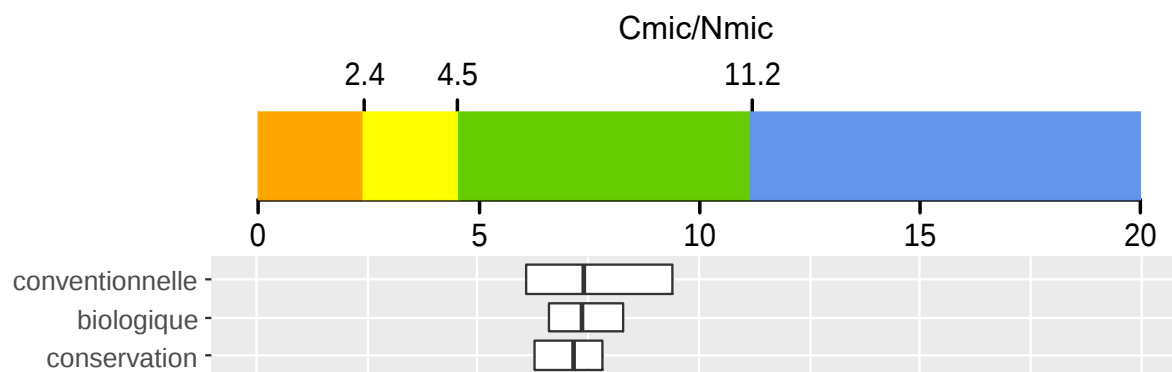


Figure 12 : Gammes de valeurs calculées du rapport C_{mic}/N_{mic} dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quartile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation.

Variabilité saisonnière :

Tableau 9 : Variabilité saisonnière du rapport C_{mic}/N_{mic} des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'.

avril	juin	août	octobre

Légende : < <

Protocole de mesure

Matériel, appareillage, réactifs

- Berlins (50 ml)
- Erlenmeyers (250 ml)
- Entonnoir
- Filtres (Whatman 42)
- Tube en verre
- Flacons en PE
- Dessiccateur
- Hotte d'extraction et masque à gaz pour travail avec chloroforme
- Agitateur horizontal
- Analyseur de TOC
- Chloroforme sans éthanol
- K₂SO₄ (0,5M)
- Acide phosphorique (85%)
- Dispositif et réactifs pour l'analyse de l'azote total (pour liquides)

Mode opératoire

Le rapport C_{mic}/N_{mic} est calculé à partir du carbone microbien et de l'azote microbien. Les deux valeurs sont calculées à partir des mesures effectuées dans les mêmes extraits de sol (fumigé et non-fumigé). Le protocole de mesure exact pour la fumigation-extraction avec du chloroforme est expliqué dans la section sur le carbone microbien.

Expression des résultats

Le rapport C_{mic}/N_{mic} est exprimé en gramme de carbone microbien par gramme d'azote microbien.

Remarques méthodologiques

Des rapports C_{mic}/N_{mic} atomiques (mol par mol) sont également retrouvés dans la littérature.

Interprétation et conseils -

Les rapports en éléments, notamment C, N et P sont spécifiques des cellules bactériennes et fongiques (Cleveland et Liptzin, 2007). Le rapport C/N des bactéries se situe entre 3 et 6, alors que le rapport C/N des champignons est entre 5 et 15 (McGill *et al.*, 1981). Ainsi, un rapport C_{mic}/N_{mic} élevé indique que la communauté microbienne est dominée par des champignons alors qu'un rapport C_{mic}/N_{mic} plus faible indique une communauté microbienne dominée par des bactéries. Ce paramètre donne donc une indication d'un éventuel changement d'organismes dans la communauté (Hu *et al.*, 2001; Carney *et al.*, 2007; Güsewell and Gessner, 2009). En effet, les besoins en nutriments de bactéries sont estimés comme étant moins élevés que ceux des champignons (Strickland et Rousk, 2010).

NB : Il est important de distinguer entre le rapport C_{mic}/N_{mic} et le rapport C/N de la matière organique du sol. Ce dernier permet d'estimer le degré d'évolution de la matière organique du sol.

4.9 Potentiel métabolique

Qu'est-ce que c'est ?

Le potentiel métabolique est une mesure de la diversité fonctionnelle de la communauté microbienne du sol par CLPP (Community level physiological profiling). Elle mesure la capacité des bactéries du sol à dégrader différents substrats carbonés.

Principe de mesure

Un extrait de sol est incubé dans une plaque contenant des puits avec 31 substrats carbonés différents. Un indicateur coloré, contenu dans les puits, devient mauve lorsque les bactéries décomposent le substrat carboné.

Gammes de valeurs en Wallonie

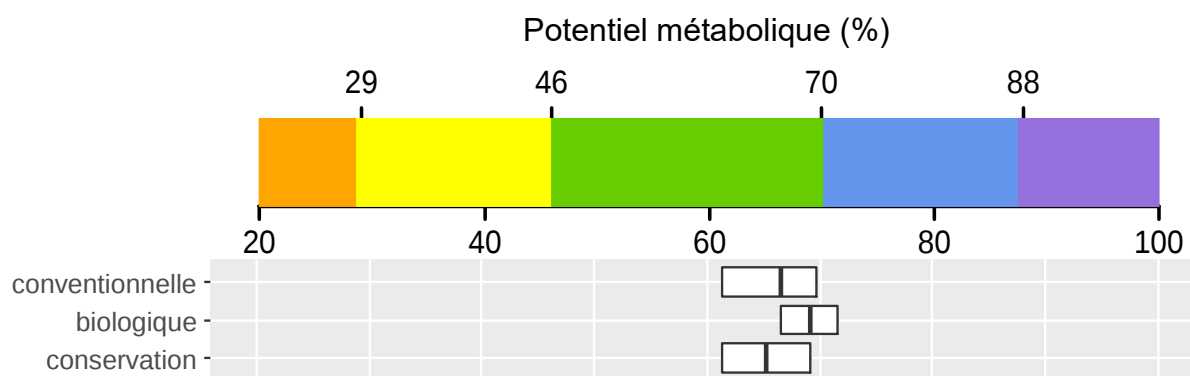
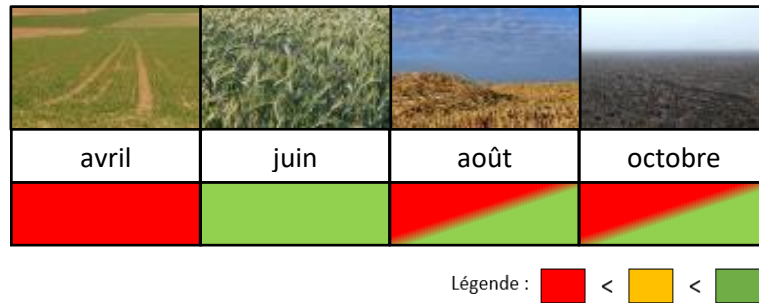


Figure 13 : Gammes de valeurs calculées du potentiel métabolique (%) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert), 'élevées' (droite, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1er quartile, la médiane et le 3ème quartile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation.

Variabilité saisonnière :

Tableau 10 : Variabilité saisonnière du potentiel métabolique des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'.



Protocole de mesure

Matériel, appareillage, réactifs

- Balance d'une exactitude de 0,1 g
- Une hotte à flux laminaire
- Un incubateur
- Pipettes de 100µl et de 10ml
- Boîte de Pétri, avec le milieu de culture R2A
- Ecoplate de BIOLOG (31 substrats carbonés)
- Tubes à essai
- Vortex
- Solution de cholate de sodium (0,1%)
- Solution de NaCl (0,85%)
- Ethanol
- OPTION : lecteur de microplaques à la longueur d'onde de 590 nm

Mode opératoire

1 g de sol frais est pesé dans un tube à essai. Ajouter 9 ml de cholate de sodium. Agiter vigoureusement pendant une minute à l'aide d'un vortex de paillasse. Transvaser 1 ml de la suspension d'extrait dans un autre tube et ajouter 9 ml de solution de NaCl. Répéter la dernière étape encore deux fois pour effectuer trois dilutions (10^{-2} , 10^{-3} et 10^{-4}). Transvaser 100 µl de chaque dilution sur une boîte de Pétri. Incuber les boîtes de Pétri pendant 72 heures à 20°C. Compter ensuite le nombre de colonies. Travailler sous une hotte à flux laminaire.

Peser 1 g de sol frais dans un tube d'essai et extraire avec du cholate de sodium de manière analogue à celle décrite ci-dessus. Réaliser une dilution avec la solution de NaCl qui correspond à 1000 à 2000 UFC (unité formant une colonie). Transvaser 100 µl de cette solution dans chacun des 32 puits uniques sur une Ecoplate de BIOLOG. Incuber les Ecoplates de BIOLOG™ pendant 72 heures à 20°C. Après l'incubation, identifier et compter les puits devenus mauve ou lire les plaques dans un lecteur de microplaques à la longueur d'onde de 590 nm.

Expression des résultats

La diversité fonctionnelle des bactéries du sol est exprimée en % de substrats utilisés.

Remarques méthodologiques

L'extraction du sol est optimisée pour atteindre un nombre de CFU élevé.

Interprétation et conseils -

Le potentiel métabolique permet de caractériser la communauté microbienne au niveau de ses fonctions. Il s'agit d'une mesure de la diversité des fonctions (de minéralisation de différents substrats carbonés) que la communauté peut réaliser. La diversité fonctionnelle peut être facilement reliée à des services écosystémiques (Pankhurst *et al.*, 1996). Ainsi, le potentiel métabolique peut renseigner sur la capacité de la communauté microbienne à s'adapter aux changements environnementaux.

Si le potentiel métabolique est faible, cela signifie que les bactéries ne peuvent dégrader qu'un nombre limité de substrats carbonés, ce qui peut limiter le fonctionnement global du sol. De plus, un faible potentiel métabolique est signe d'une fragilité de l'écosystème. En effet, en cas de perturbation, le fonctionnement du sol sera d'autant plus affecté que la diversité fonctionnelle est faible. Ainsi, un potentiel métabolique élevé est signe d'une meilleure résistance de l'écosystème. Il est important de noter que les variables pédologiques, notamment la texture du sol, le pH, la teneur en matière organique, influencent la diversité fonctionnelle des bactéries.

L'application d'amendements organiques comme du vermicompost, du fumier ou des boues de stations d'épuration, peut accroître le potentiel métabolique du sol (Gomez *et al.*, 2006; Frac *et al.*, 2012), ce qui n'est pas le cas des amendements minéraux (Islam *et al.*, 2011; Frac *et al.*, 2012). Le travail du sol et la rotation des cultures ne semblent pas avoir d'effet sur le potentiel métabolique (Gałązka *et al.*, 2017). En revanche, le potentiel métabolique est plus élevé dans des sols gérés selon une agriculture biologique comparé à une agriculture conventionnelle (Bending *et al.*, 2004).

4.10 Respiration potentielle

Qu'est-ce que c'est ?

La respiration potentielle est une mesure de la vitesse de la minéralisation du carbone organique en CO₂ lors de la décomposition de la matière organique du sol par les micro-organismes.

Principe de mesure

La respiration potentielle est mesurée comme production de CO₂ d'un échantillon de sol frais dans une bouteille hermétiquement fermée dans des conditions définies. Pour cette mesure, il convient d'ajuster l'humidité du sol à 60% de la capacité au champs (voir avant).

Gammes de valeurs en Wallonie

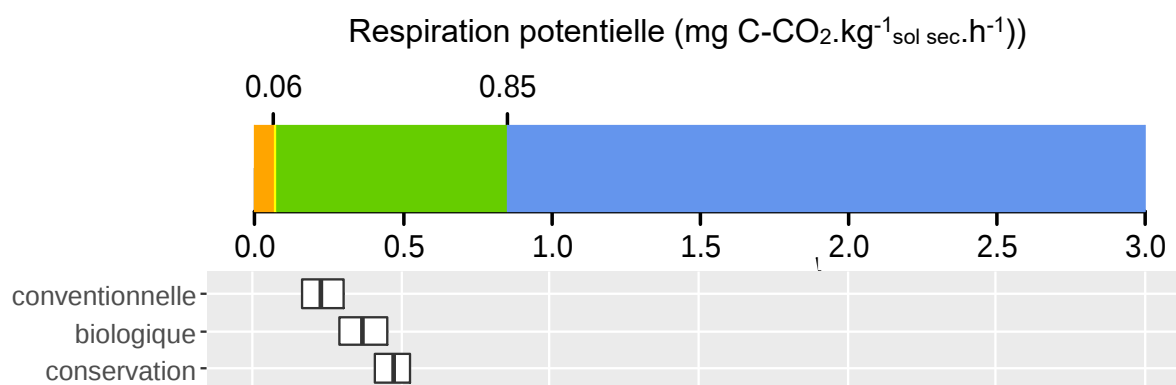


Figure 14 : Gammes de valeurs calculées de la respiration potentielle (mg C-CO₂.kg⁻¹_{sol} sec.h⁻¹) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert) et 'élevées' (droite, bleu). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quartile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation.

Variabilité saisonnière :

Tableau 11 : Variabilité saisonnière de la respiration potentielle des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'.

			
avril	juin	août	octobre
			

Légende :  <  < 

Protocole de mesure*Matériel, appareillage, réactifs*

- Balance avec exactitude de 0,1 g
- Bouteille opaque de 250 ml avec bouchons équipés de septa en silicone
- Seringue pour gaz d'un volume de 5 ml
- Analyseur de CO₂
- Chambre/incubateur à température constante (15°C)

Mode opératoire

20 g de sol frais sont pesés dans une bouteille de 250 ml. Placer la bouteille dans une chambre à l'abri de la lumière à 15°C pendant 12 heures pour conditionner l'échantillon. Fermer la bouteille avec un bouchon équipé d'un septum en silicone. Prendre immédiatement 4 ml de l'air dans la bouteille avec la seringue et mesurer la concentration de CO₂ par absorption d'infra-rouge (temps 0 min). Répéter la mesure de la concentration de CO₂ à 120, 150 et 180 minutes. La bouteille est placée à l'abri de la lumière entre les mesures. Calculer la respiration potentielle par régression linéaire des quatre points.

Expression des résultats

La respiration potentielle est exprimée en milligramme de carbone (C-CO₂) par kilogramme de sol sec et par heure.

Remarques méthodologiques

Mesurer la concentration de CO₂ quatre fois permet de contrôler si la production de CO₂ est linéaire. La régression linéaire donne des R² proche de 1 ce qui démontre la bonne qualité de la méthode utilisée. La température de 15°C correspond à la température moyenne en

Wallonie en juillet. Une incubation à cette température permet donc de mesurer la respiration dans des conditions auxquelles la communauté microbienne est adaptée. Cependant, différentes normes préconisent différentes températures d'incubation. Celle-ci pourrait être définie en fonction des besoins et possibilités (incubateur) en concertation avec les autres laboratoires d'analyse. Comme la respiration dépend fortement de la température, il faudra par la suite utiliser la même température pour toutes les mesures.

La respiration potentielle présente une alternative à la respiration basale, qui mesure la production de CO₂ d'un sol dans un état stable (après une pré-incubation et une incubation d'une à trois semaines). Toutefois les mesures après 12 heures sont fortement corrélées avec des mesures effectuées après des incubations plus longues et sont donc aussi pertinentes pour l'évaluation de la qualité du sol que les mesures de la respiration basale.

Interprétation et conseils -

La respiration potentielle est une mesure de l'activité de la communauté microbienne au moment de l'échantillonnage. Pendant la décomposition de la matière organique, la communauté microbienne transforme les composants organiques de la matière organique en composants inorganiques, pouvant être assimilés par les plantes. Il s'agit de la principale fonction des micro-organismes. Ainsi, la respiration du sol est souvent mise en avant en tant qu'indicateur de la qualité du sol (Bispo *et al.*, 2009; Wood and Litterick, 2017).

Pour certains sites agricoles, on peut observer une respiration élevée du sol sans toutefois qu'il soit très riche en carbone organique total. Cela peut être expliqué par la disponibilité différente des fractions carbonées et/ou par des apports exogènes récents de carbone qui ont provoqué un accroissement de l'activité des micro-organismes. A l'inverse, s'il y a peu de respiration par rapport au carbone organique, cela signifie que la matière organique est vieille et très stable.

La respiration potentielle des sols gérés en agriculture biologique est plus élevée que les sols gérés en agriculture conventionnelle (van Diepeningen *et al.*, 2006), mais cela dépend de la texture du sol (argileux, sableux *etc.*).

Pour augmenter la respiration potentielle d'un sol agricole, le paillage ou l'amendement d'un compost semble efficace selon García-Orenes *et al.* (2010) et Carpenter-Boggs *et al.* (2000). En revanche, la fertilisation minérale n'a pas d'effet sur la respiration potentielle (Carpenter-Boggs *et al.*, 2000).

4.11 Minéralisation nette de l'azote

Qu'est-ce que c'est ?

La minéralisation nette de l'azote est la transformation de l'azote sous forme organique en azote minéral (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-). Elle donne des informations sur la disponibilité de l'azote pour les plantes, indispensable à leur croissance.

Principe de mesure

La minéralisation nette de l'azote est calculée par la différence entre la quantité d'azote minéral (NH_4^+ et NO_3^-) avant et après une incubation de 28 jours à 25°C en absence de racines et de lessivage. Pour cette mesure, il convient d'ajuster l'humidité du sol à 60% de la capacité au champ (voir avant).

Gammes de valeurs en Wallonie

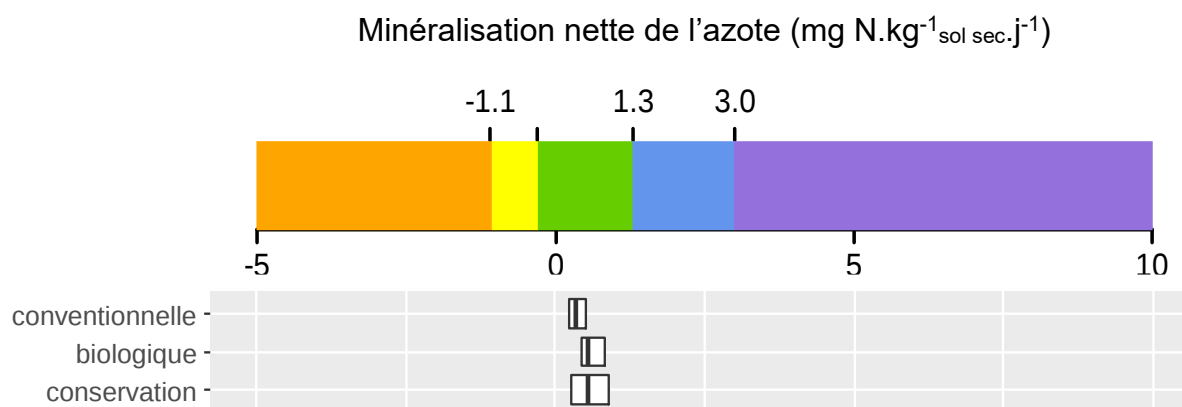
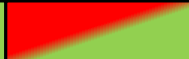
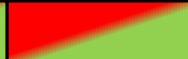


Figure 15 : Gammes de valeurs calculées de la minéralisation nette de l'azote ($\text{mg N.kg}^{-1}_{\text{sol sec.j}^{-1}}$) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert), 'élevées' (droite, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation.

Variabilité saisonnière :

Tableau 12 : Variabilité saisonnière de la minéralisation nette de l'azote des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'.

			
avril	juin	août	octobre
			

Légende :  <  < 

Protocole de mesure

Matériel, appareillage, réactifs

- Balance d'une exactitude de minimum 0,1 g
- Berlins de 100 ml
- Parafilm
- Incubateur ou chambre noire avec température constante (25°C)
- Agitateur horizontal
- Centrifugeuse et tube à centrifuger de 250 ml
- Fioles en PE
- Congélateur
- KCl (1 M)
- Eau distillée
- Dispositif et réactifs pour l'analyse de l'azote minéral

Mode opératoire

20 g de sol frais sont pesés dans un tube à centrifuger de 250 ml. Ajouter 40 ml de KCl (1M) et placer le tube sur un agitateur horizontal pendant une heure à 180 rpm. Centrifuger les échantillons à 3000 rpm pour 10 minutes. Les concentrations d'azote minéral sont mesurées dans le surnageant.

Si les concentrations d'azote minéral dans l'extrait ne peuvent pas être mesurées immédiatement, transvaser le surnageant dans des fioles en PE et les congeler jusqu'à l'analyse.

Peser un deuxième sous-échantillon de 20 g de sol frais dans un berlin. Mesurer la masse totale de l'échantillon avec le berlin. Recouvrir le berlin avec du parafilm percé à deux ou trois points pour permettre l'aération. Incuber le berlin à l'abri de lumière à une température constante (25°C) pendant 28 jours. Peser le berlin au moins une fois par semaine et ajuster

l'humidité avec de l'eau distillée. Après l'incubation, extraire le sol de façon analogue aux échantillons non-incubés.

Expression des résultats

La minéralisation nette de l'azote est calculée par la différence entre la quantité d'azote minéral (NH_4^+ et NO_3^-) avant et après l'incubation, exprimée en milligramme d'azote par kilogramme de sol sec par jour.

Remarques méthodologiques

Différentes normes préconisent différentes températures d'incubation. Celle-ci pourrait être définie en fonction des besoins et possibilités (incubateur par ex.) en concertation avec les autres laboratoires d'analyse. Ensuite, il faudra utiliser la même température pour toutes les mesures.

Interprétation et conseils -

La minéralisation nette de l'azote est un processus important dans le cycle de l'azote. La majorité de l'azote du sol se trouve en forme organique, donc indisponible pour les plantes. La transformation de l'azote en forme minérale par les micro-organismes rend l'azote disponible. La minéralisation nette de l'azote est donc un indicateur de la disponibilité de l'azote pour les plantes. De plus, elle donne des informations sur l'activité des micro-organismes, le cycle de l'azote, et le risque de lessivage des nitrates.

Si la quantité d'azote minéralisée est très faible, cela indique que l'azote n'est pas disponible pour la plante durant deux à trois mois (minimum) suivant le prélèvement car il y a une immobilisation de l'azote par la biomasse microbienne (N'Dayegamiye, 2007). Il faudra intégrer cette « faim d'azote » dans l'itinéraire cultural.

L'apport d'amendements organiques, riches en azote, est indispensable pour améliorer la minéralisation. La minéralisation nette de l'azote sera élevée pour les matières organiques fraîches à rapport C/N faible. Les matières organiques à C/N très élevé peuvent provoquer une « faim d'azote » car, les micro-organismes du sol utilisent l'azote (en l'immobilisant dans leurs cellules), le rendant indisponible pour les plantes. Les matières organiques d'origine animale libèrent plus rapidement leurs éléments minéraux, dont l'azote, et stimulent momentanément l'activité microbienne mais n'enrichissent pas durablement le sol en humus.

Le travail réduit (par exemple, le semis direct) permet de conserver la matière organique du sol, car celle-ci ainsi que les résidus organiques se minéralisent plus lentement. Cependant, les taux de minéralisation d'azote sont plus faibles sous semis direct, et on peut alors parfois retrouver une immobilisation d'azote par les micro-organismes sous ce mode de culture, ce

qui peut exiger un apport supplémentaire d'engrais azoté pour combler les besoins des plantes (N'Dayegamiye, 2007). Germon *et al.* (1994) ont démontré que le travail conventionnel du sol (labour) peut permettre une plus grande minéralisation de l'azote à cause des températures généralement plus élevées au printemps, contrairement au travail réduit (semis direct).

Il est à noter que la minéralisation de l'azote est notamment sous la dépendance des taux d'argile et de calcaire, de la température et de l'humidité du sol (Mary *et al.*, 1999).

4.12 Densité en vers de terre

Qu'est-ce que c'est ?

Les lombricidés sont un sous-ordre des annélides, qui regroupe tous les vers de terre. Parmi la macrofaune, les vers de terre sont considérés comme des organismes « clés » dans le fonctionnement du sol.

Principe de mesure

Le contact avec une solution de moutarde irrite les vers de terre qui remontent à la surface du sol. Les vers de terre peuvent alors être échantillonnés de manière non-destructive pour le sol.

Gammes de valeurs en Wallonie

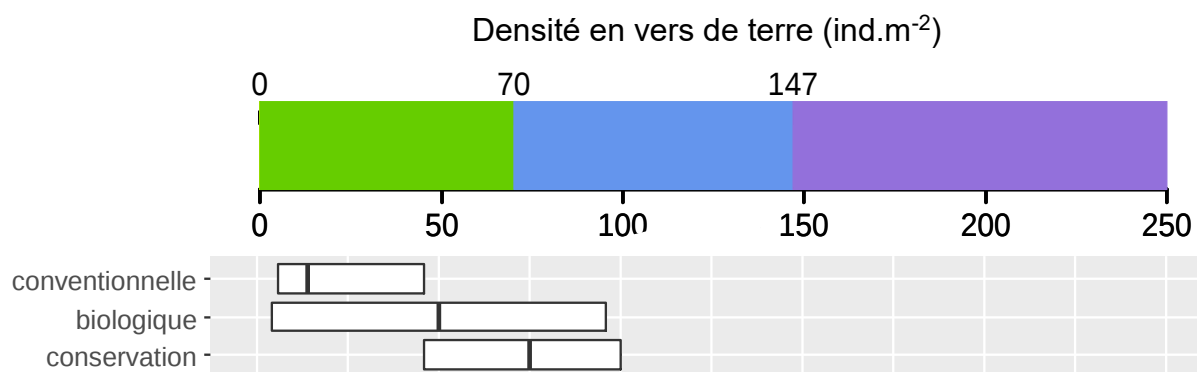
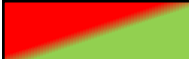
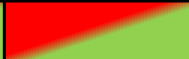


Figure 16 : Gammes de valeurs calculées de la densité en vers de terre (individus .m⁻², ind.m⁻²) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'moyennes' (gauche, vert), 'élevées' (centre, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quartile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation.

Variabilité saisonnière :

Tableau 13 : Variabilité saisonnière de la densité en vers de terre des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'.

			
avril	juin	août	octobre
			

Légende :  <  < 

NB : Masse de vers de terre

L'abondance des vers de terre est positivement corrélée avec la masse des vers de terre. Toutefois, la masse moyenne des vers de terre varie entre sites échantillonnés (valeurs entre 0,1 et 3,6 grammes de vers de terre saturés en éthanol).

Protocole de mesure

Matériel, appareillage, réactifs

- Balance d'une exactitude de minimum 0,1 g
- Cadre en bois (60 × 30 cm)
- Cisaille à herbes
- Arrosoir de 10 l
- Seau de 10 l
- Bidon de 10 l
- Bouteille en plastique
- Papier essuie-tout
- Pincette
- Farine de moutarde
- Ethanol à 70%
- Eau

Mode opératoire

Une surface est délimitée avec le cadre en bois (60 × 30 cm). Verser 4 l d'eau dans un seau, ajouter 12 g de farine de moutarde et mélanger la solution. Couper toute la végétation du sol sur la parcelle pour augmenter la visibilité lors de l'apparition des vers de terre. Transvaser la solution de moutarde dans l'arrosoir. Préparer une deuxième solution de farine de moutarde (4 l d'eau et 24 g de farine de moutarde) dans le seau. Distribuer la solution de moutarde avec

l'arrosoir sur la parcelle de manière homogène. Collecter tous les vers de terre qui sortent du sol et les conserver dans une bouteille en plastique remplie à moitié avec de l'éthanol à 70%. Verser la deuxième solution de farine de moutarde sur la parcelle après environ 10 minutes. Observer la parcelle pendant quelques minutes après la sortie du dernier vers de terre.

Les vers de terre sont comptés et pesés au laboratoire. Enlever les vers de terre de la solution d'éthanol avec une pincette. Si nécessaire, nettoyer les vers de terre avec de l'éthanol frais. Poser les vers de terre sur un essuie-tout. Compter les vers de terre. Peser l'essuie-tout avec les vers de terre, puis sans les vers de terre. Calculez la masse de vers de terre en faisant la différence. Les vers de terre sont remis dans la bouteille en plastique pour conservation.

Expression des résultats

La densité de vers de terre est exprimée en individus par m^2 et la masse de vers de terre est exprimée en g de vers de terre saturé en éthanol par m^2 .

Remarques méthodologiques

La densité de vers de terre dépend de la saison et des conditions climatiques. Pour cette raison, un échantillonnage au printemps ou à l'automne est préférable. De plus, des périodes de sécheresse ou lorsque le sol est saturé en eau sont à éviter car la solution de farine de moutarde ne peut pas infiltrer le sol.

La méthode d'extraction avec la farine de moutarde a été choisie en faveur de la norme ISO qui propose une extraction avec du formol et un triage à la main. L'extraction avec une solution de farine de moutarde au lieu de la technique proposée par la norme ISO est, d'une part, plus rapide et d'autre part, moins nocive pour le sol. Toutefois, un biais méthodologique est à noter lorsque l'on utilise l'extraction à la moutarde. Cette méthode est surtout efficace pour les vers anéciques (vers creusant des galeries verticales) mais moins pour les espèces endogées (vers qui construisent des galeries horizontales en profondeur) (Pérès *et al.*, 2011).

Interprétation et conseils -

Le ver de terre est l'animal le plus connu du sol (Edwards, 1969) et est considéré comme un organisme « clé » dans le fonctionnement du sol. En effet, les vers de terre sont à la fois des décomposeurs, car ils se nourrissent de matières organiques mortes, et des ingénieurs du sol car ils modifient la structure et la texture du sol en créant des galeries. Les vers de terre favorisent également le transfert d'éléments nutritifs dans le sol (phénomène de bioturbation). De plus, les lombrics accroissent grandement la diversité (Lawton, 1994; Eisenhauer, 2010) et l'activité (Maraun, M; Scheu, 1999; Tiunov and Scheu, 1999) des micro-

organismes au sein des galeries et dans les turricules⁸ (Lavelle *et al.*, 1995). Grâce à leurs différents rôles dans l'écosystème, les vers de terre favorisent la fertilité du sol.

Les vers de terre sont sensibles à de nombreuses perturbations du sol comme la compaction, la dégradation ou la pollution. La densité de ces organismes représente donc un indicateur précoce de perturbation.

Une densité élevée de vers témoigne d'une faible perturbation de l'écosystème, d'un faible risque d'érosion, d'un accès à l'eau et aux nutriments par les plantes plus efficace, une meilleure dissémination des micro-organismes, ce qui améliore la minéralisation des éléments et leurs absorptions par la plantes (notamment grâce aux micro-organismes symbiotiques) et d'une meilleure régulation des pathogènes comme les nématodes (Boyer *et al.*, 2013).

Pour améliorer la densité en vers de terre dans les parcelles agricoles, il convient de leur apporter de la nourriture en surface. Ainsi, le fait de laisser des résidus de culture et de favoriser les apports de matières organiques permettront aux vers de s'installer sur les parcelles (Ménard, 2005). Le semis direct, le couvert végétal comme le paillis (Pelosi *et al.*, 2009), l'utilisation d'amendements organiques (Thomson and Hoffmann, 2007) et des stratégies phytosanitaires raisonnées (Pelosi *et al.*, 2013) sont considérés comme des pratiques agricoles favorables à l'installation des vers de terre. En revanche, le labour et le compactage ont un impact négatif considérable sur les populations de lombrics, même en présence d'un paillis et/ou d'amendement organique (Hole *et al.*, 2005; van Capelle *et al.*, 2012).

⁸ Turricule (de vers de terre) : rejet des vers de terre anéciques visibles à la surface du sol (par opposition à d'autres déjections déposées sur les parois des galeries) (Bouché, 1972).

4.13 Quotient métabolique

Qu'est-ce que c'est ?

Le quotient métabolique est un quotient éco-physiologique correspondant au rapport entre la respiration potentielle et le carbone microbien. Il donne une indication sur la quantité relative de carbone utilisé pour la croissance (biomasse microbienne) et pour l'énergie de maintenance de la cellule (respiration) (Anderson *et al.*, 1990).

Principe de mesure

Le quotient métabolique est calculé à partir des mesures du carbone microbien et de la respiration potentielle.

Gammes de valeurs en Wallonie

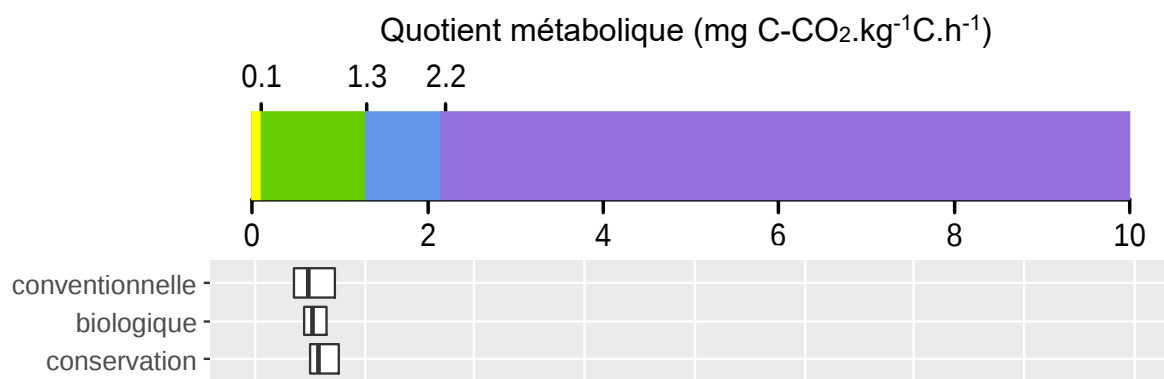


Figure 17 : Gammes de valeurs calculées du quotient métabolique ($\text{mg C-CO}_2.\text{kg}^{-1}\text{C.h}^{-1}$) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert), 'élevées' (droite, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation.

Variabilité saisonnière :

Tableau 12 : Variabilité saisonnière du quotient métabolique des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'. Ici, aucune différence significative n'est observée.

			
avril	juin	août	octobre

Légende :  <  < 

Protocole de mesure*Matériel, appareillage, réactifs*

Voir carbone microbien et respiration potentielle.

Mode opératoire

Le quotient métabolique est le rapport entre le carbone microbien et la respiration potentielle. Des analyses de laboratoires supplémentaires ne sont pas nécessaires.

Expression des résultats

Le quotient métabolique est exprimé en milligramme carbone (C-CO₂) par kilogramme carbone microbien par heure.

Remarques méthodologiques

Tout comme les mesures de respiration, les valeurs du quotient métabolique dépendent des conditions d'incubation (température).

Interprétation et conseils -

Des valeurs plus élevées du quotient métabolique sont considérées comme un indicateur de stress, indiquant un besoin d'énergie de maintenance plus élevé des micro-organismes (Anderson and Domsch, 1985). Les valeurs dépendent de la communauté microbienne ainsi que des substrats disponibles.

Un quotient métabolique normal est le signe d'un bon équilibre physiologique de la biomasse microbienne (pas de stress nutritionnels ou environnementaux), bénéfique aux cultures. Un quotient métabolique faible signifie un taux de renouvellement faible de la biomasse, avec tendance à l'accumulation, voire à une stabilisation de la matière organique.

Cette faiblesse peut être liée à des facteurs défavorables à l'activité de la biomasse comme le pH, ou l'hydromorphie. La minéralisation de la matière organique diminuant, la nutrition minérale de la plante en sera affectée. Un quotient métabolique élevée est un indicateur de stress.

Un travail du sol (style labour) augmente le quotient métabolique (Mangalassery *et al.*, 2015) pouvant être lié à une augmentation de la porosité, de la disponibilité de nutriments ce qui semble réduire le stress chez les micro-organismes (Giller *et al.*, 1997).

4.14 Quotient microbien

Qu'est-ce que c'est ?

Le quotient microbien est un quotient éco-physiologique correspondant au rapport entre le carbone microbien et le carbone organique total, exprimé en pourcentage. Il donne des renseignements sur la disponibilité du substrat carboné pour les micro-organismes.

Principe de mesure

Le quotient microbien est calculé à partir des mesures de carbone microbien et de carbone organique total.

Gammes de valeurs en Wallonie

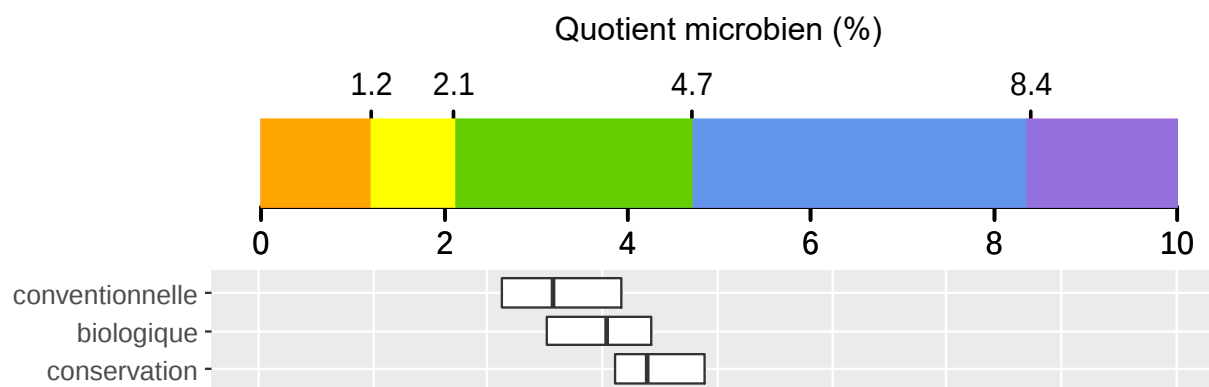


Figure 18 : Gammes de valeurs calculées du quotient microbien (%) dans les sols de culture en Wallonie. Les barres en couleur montrent les limites des gammes de valeurs 'très faibles' (gauche, orange), 'faibles' (gauche, jaune), 'moyennes' (centre, vert), 'élevées' (droite, bleu) et 'très élevées' (droite, violet). Les boîtes de Tukey (en dessous de la gamme) représentent le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quantile des valeurs de l'indicateur mesurées en 2016 selon les pratiques agricoles - conventionnelle, biologique et conservation.

Variabilité saisonnière :

Tableau 15 : Variabilité saisonnière du quotient microbien des parcelles en agriculture conventionnelle en 2016 en 2016. Les couleurs indiquent des différences significatives entre les moyennes (test de l'ANOVA); 'rouge' est significativement plus faible que 'jaune' qui est significativement plus faible que 'vert'. Ici, aucune différence significative n'est observée.

			
avril	juin	août	octobre

Légende :  <  < 

Protocole de mesure*Matériel, appareillage, réactifs*

Voir carbone microbien et carbone organique total.

Mode opératoire

Le quotient microbien est le rapport entre le carbone microbien et le carbone organique total, multiplié par 100 pour l'exprimer en %. Des analyses de laboratoires supplémentaires ne sont pas nécessaires.

Expression des résultats

Le quotient microbien est exprimé en % de carbone microbien dans le carbone organique totale.

Interprétation et conseils -

Le quotient microbien est un indice de la disponibilité du carbone. Habituellement, la biomasse microbienne représente moins de 5% de la matière organique totale du sol (Dalal, 1998). Des quotients microbiens autour de 2,2 % sont attendus dans des sols agricoles en équilibre (Anderson et Domsch, 1989). Le quotient microbien peut être utilisé comme indicateur précoce de l'évolution du carbone organique. Une augmentation ou une diminution du carbone microbien est censée être suivie par une évolution similaire du carbone organique total (Anderson et Domsch, 1989).

Selon van Capelle *et al.* (2012), le quotient microbien est plus élevé lorsque l'intensité du travail du sol est réduite, ce qui indique une amélioration de l'approvisionnement des

nutriments (par rapport à une gestion conventionnelle avec labour). Ceci est probablement dû à la qualité supérieure de la matière organique, qui fournit des quantités plus élevées de glucides et d'acides aminés disponibles, accompagnés d'une proportion accrue de racines plus proches de la surface du sol. De plus, la fertilisation minérale (N,P,K) augmente le quotient microbien par rapport à un sol non labouré (Juan *et al.*, 2008). La fertilisation organique par du compost augmente le quotient microbien par rapport à un sol non fertilisé (Leifeld *et al.*, 2002).

5 Base de données et outils associés

5.1 Les bases de données 'CARBIOSOL' et 'REFERENTIEL'

La base de données (BDD) « **CARBIOSOL – indicateurs biologiques et carbone organique des sols agricoles wallons** » comprend les valeurs des indicateurs biologiques et des fractions de carbone mesurées au cours des subventions CARBIOSOL I à IV. Cette BDD est constituée de 415 échantillons de sols (124 provenant de sols sous cultures et 66 de sols de prairies), prélevés sous deux occupations différentes (en 2013 et 2014), dans cinq régions agricoles (en 2015), pendant quatre périodes d'échantillonnage (en 2016), sous sept types de cultures (en 2017) et sous quatre types d'exploitations agricoles (en 2013, 2014, 2015, 2016 et 2017). Les sols sous cultures appartiennent à des agriculteurs volontaires et les sols sous prairies proviennent du réseau de mesure BioEcoSys. La BDD est disponible avec un mot de passe sur le site www.carbiosol.uliege.be. Etant des parcelles expérimentales, les données issues des essais à long terme de LongTours, Gentinnes et de Libramont du CRA-W n'ont pas été intégrées à cette BDD. Les résultats obtenus sur les essais à long terme sont présentés dans le §6.

La base de données « **RÉFÉRENTIEL wallon de la qualité biologique des sols agricoles** » a été construite comme **partie intégrante de la BDD centralisée REQUASUD**, et est de ce fait hébergée, gérée et alimentée par l'asbl REQUASUD. Elle est directement issue de la BDD 'CARBIOSOL', mise au format de la BDD centralisée de REQUASUD. Cette initiative s'intègre dans le processus de mise à disposition, pour les agriculteurs, de la mesure des indicateurs biologiques et des fractions de carbone par les laboratoires du réseau REQUASUD. Les données obtenues lors du projet de recherche CARBIOSOL concernent donc les indicateurs présentés dans cette brochure.

L'ensemble des mesures issues du RSS CARBIOSOL seront les premières données implémentées dans la BDD RÉFÉRENTIEL. Les gammes de valeurs de références issues de l'analyse de ces données, et présentées en §4, permettront de valider les mesures obtenues par la suite par les laboratoires souhaitant mettre en routine un ou plusieurs des indicateurs de la qualité biologique des sols. Ces nouvelles mesures viendront ensuite alimenter le RÉFÉRENTIEL, et à terme, les gammes de valeurs de références pourront être mises à jour et affinées.

5.2 Corrélogramme

Dans le but d'évaluer les relations entre les indicateurs, un corrélogramme est présenté en figure 19. Il s'agit d'un tableau reprenant les corrélations entre tous les indicateurs. Ce corrélogramme permet de choisir des indicateurs indépendants, afin d'obtenir un maximum d'informations différentes possibles, avec un minimum de mesures. Ainsi, ce corrélogramme permet de choisir des indicateurs non-correlés afin d'avoir des informations différentes sur le fonctionnement des sols.

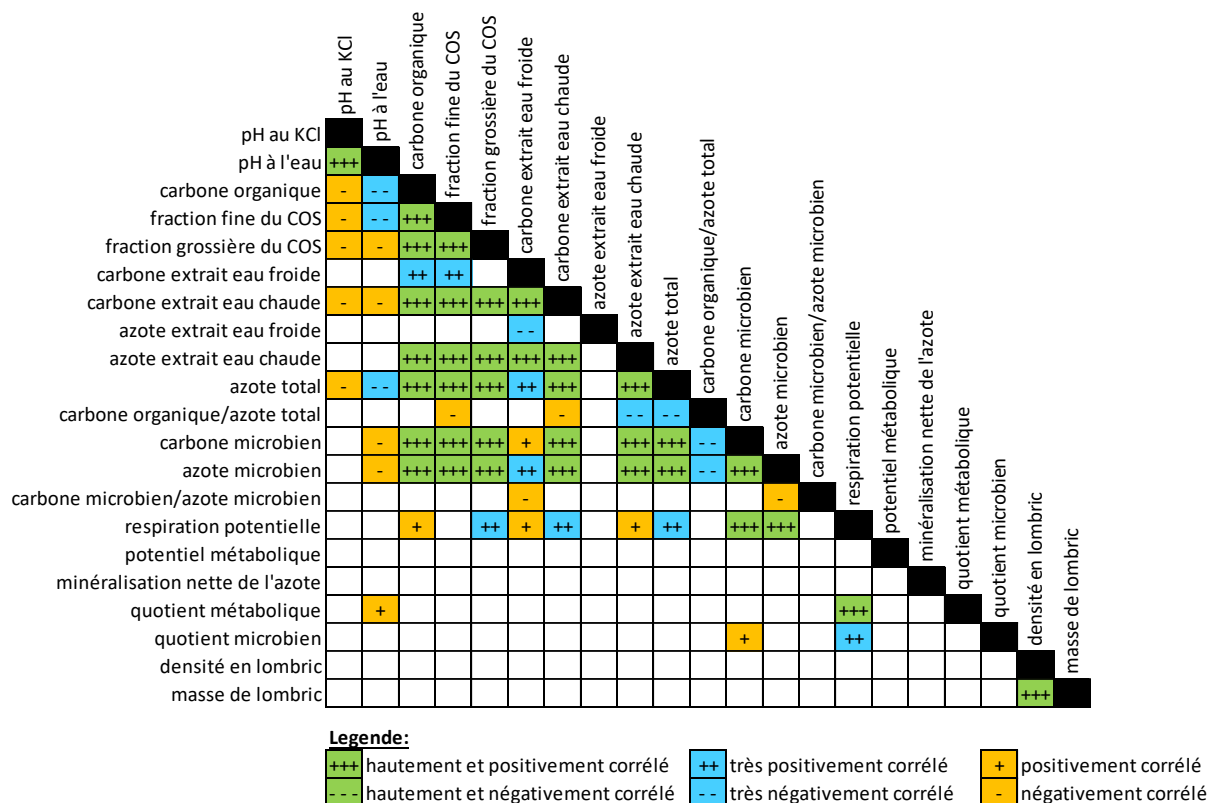


Figure 19 : Corrélogramme des indicateurs mesurés dans le RSS CARBIOSOL dans des sols cultivés dont l'échantillonnage a eu lieu en 2013, 2014 (carbioso1), 2015 (carbioso2), 2016 (carbioso3) et 2017 (carbioso4). n minimal=120 et n maximal=366. Jaune - $p < 0,05$; Bleu - $p < 0,01$; Vert - $p < 0,001$; Blanc - $p > 0,05$. Test rho de Spearman.

5.3 Outils graphiques et cartographiques

Des scripts informatiques pour le logiciel 'R' ont été élaborés afin de produire aisément différents graphiques et cartes. Ces documents sont des supports pour exploiter les résultats des indicateurs présentés dans cette brochure. L'utilisation de scripts informatiques facilite également la mise à jour de ces graphiques et cartes au fur et à mesure de l'alimentation de la BDD 'RÉFÉRENTIEL'. Le package de scripts est disponible dans le rapport final « CARBIOSOL 5 ».

À l'échelle régionale - Cartographie du COT

Une méthode se basant sur les principes de la cartographie numérique des sols a été développée au cours du projet CARBIOSOL (rapport final CARBIOSOL I - Chartin *et al.*, 2015), et adaptée à la base de données centralisée de REQUASUD (rapport final CARBIOSOL III - Chartin *et al.*, 2016). Elle a permis la production de différentes cartes de la série CARBIOSOL consultables sur le géoportail de la région wallonne (geoportail.wallonie.be), et de contribuer à la mise à jour du rapport sur l'état de l'environnement wallon 2017 (figure 20).

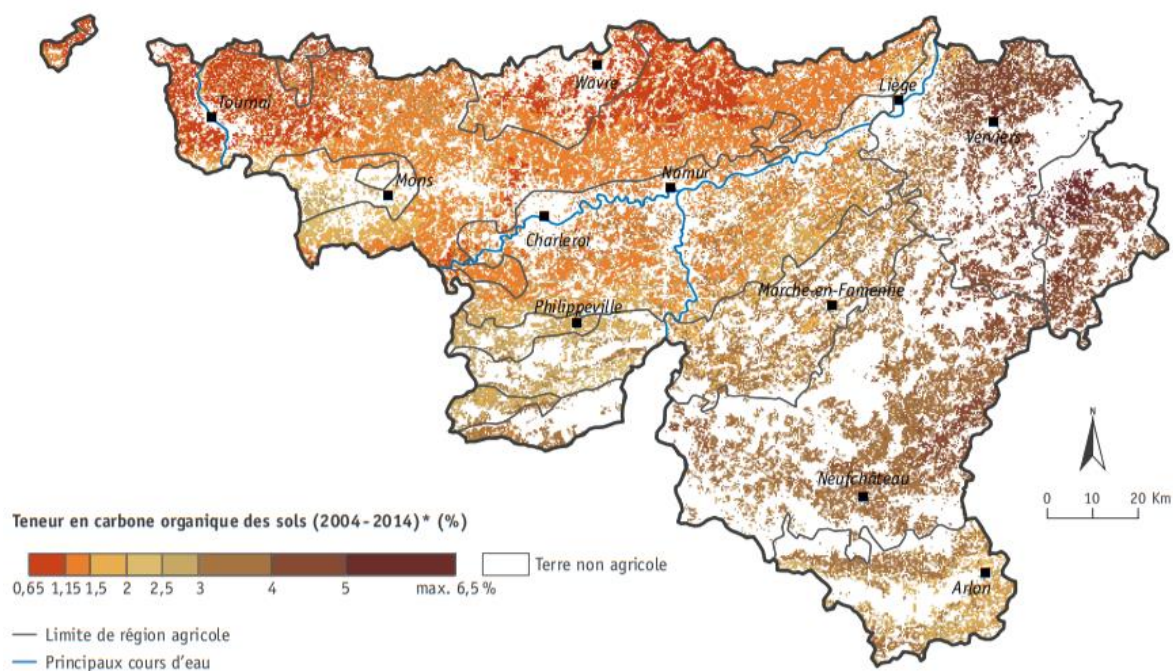


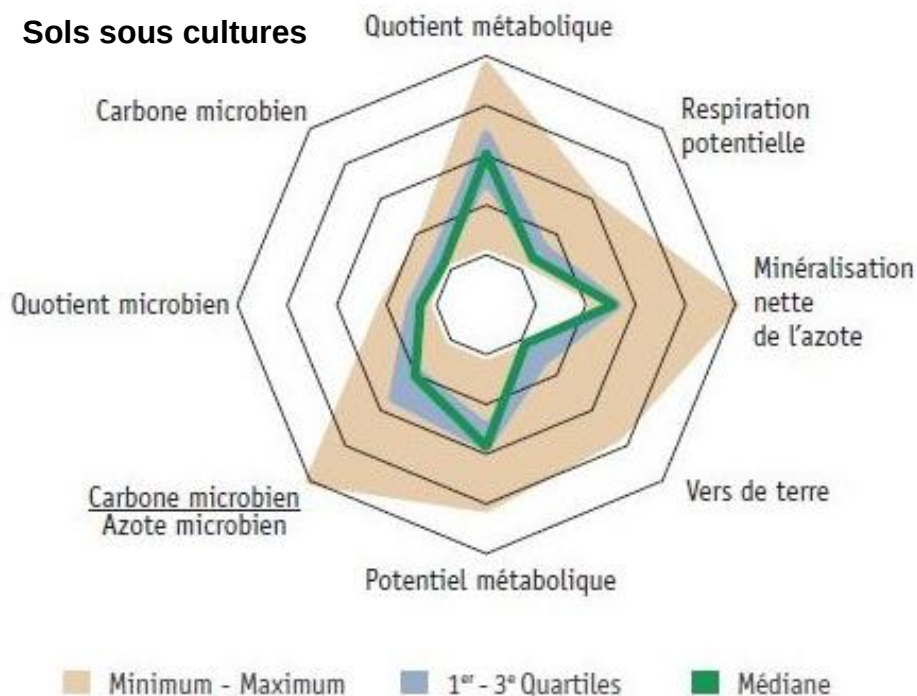
Figure 20 - Teneurs en carbone organique des sols agricoles wallons. REEW 2017 – source - UCL-ELI-TECLIM ; REQUASUD (licence A09/2016).

Les scripts informatiques 'R' associés, ainsi qu'une notice d'utilisation, ont été fournis à l'équipe de REQUASUD qui pourra les utiliser dès qu'une mise à jour de la carte de COT des sols agricoles wallons sera nécessaire. Celle-ci sera ensuite disponible au public sur le géoportail du SPW. En complément de la cartographie du COT, un autre script sera fourni pour calculer des statistiques par occupation de sols et régions agricoles, et de les comparer d'une période à une autre afin de détecter les éventuelles évolutions spatio-temporelles du COT en Wallonie.

À l'échelle parcellaire

Afin de **comparer les pratiques agricoles** (conventionnelle, conservation et biologique), des représentations graphiques en boîtes de Tukey ont été utilisés pour chaque indicateur. Ces graphiques sont présents dans chaque fiche, sous la gamme de référence. Les scripts R pour produire ces graphiques sont présentés dans le rapport final « CARBIOSOL 5 ».

Pour **comparer l'occupation du sol** (culture ou prairie), des représentations graphiques en plots radar (Figure 21) ont été utilisées pour montrer l'ensemble des indicateurs biologiques dans une seule figure. Chaque indicateur biologique est montré sur un axe du plot radar ; les axes vont du centre (5^{ème} quantile, 5%) à l'extrémité du plot (95^{ème} quantile, 95%) et contiennent donc 90% des valeurs attendues sous culture ou sous prairie en Wallonie.



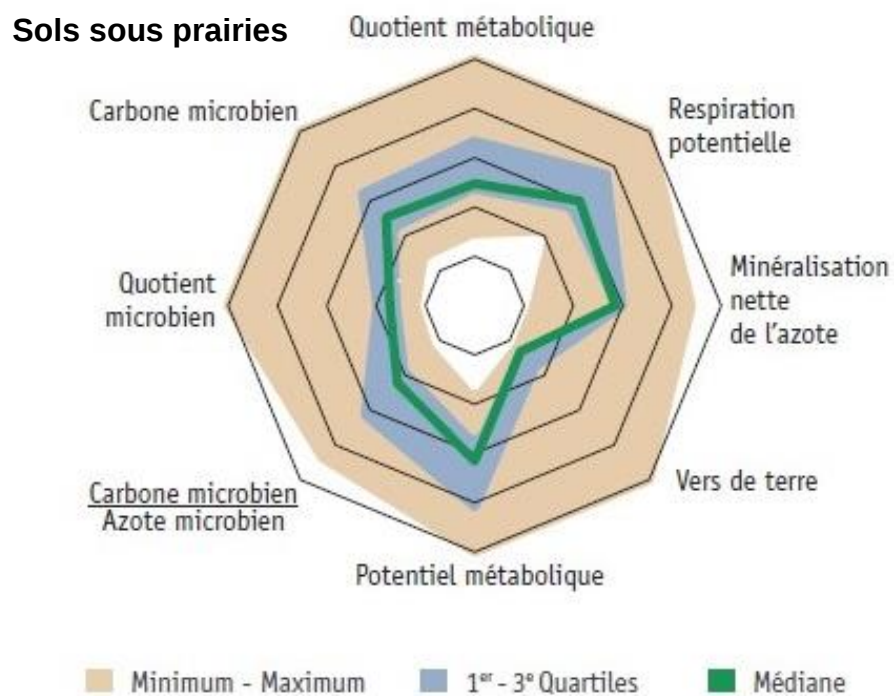


Figure 21 : Plot radar des gammes définies des sols sous cultures ou sous prairies de la Wallonie tenant compte de la variabilité saisonnière et spatiale (Krüger *et al.*, 2015).

6 Exemple d'application des indicateurs - Effets de l'exploitation et des pratiques agricoles.

Effets du type d'exploitation

L'exploitation agricole des sols comprend souvent des pratiques ayant une influence négative sur le sol et ses organismes (Baudron and Giller, 2014). Notamment, Ainsi, des alternatives à l'agriculture dite 'conventionnelle' ont été proposées comme plus durables et ayant moins d'impacts négatifs sur le fonctionnement du sol (Wezel *et al.*, 2014). Les deux grands types d'agricultures alternatives pratiquées en Wallonie sont l'agriculture biologique et l'agriculture de conservation. Certaines parcelles sont en cours de « conversion biologique » (parcelles converties à l'agriculture biologique il y a moins de 3 ans). Il est à noter que les agriculteurs gérant leurs parcelles selon une agriculture alternative (conservation ou biologique) pratiquent tous des TCS.

Un effet des pratiques d'agriculture alternative par rapport à l'agriculture 'conventionnelle' a été observé sur 12 des indicateurs du RSS CARBIOSOL sur les sols prélevés en 2016. Les résultats sont présentées en figure 22.

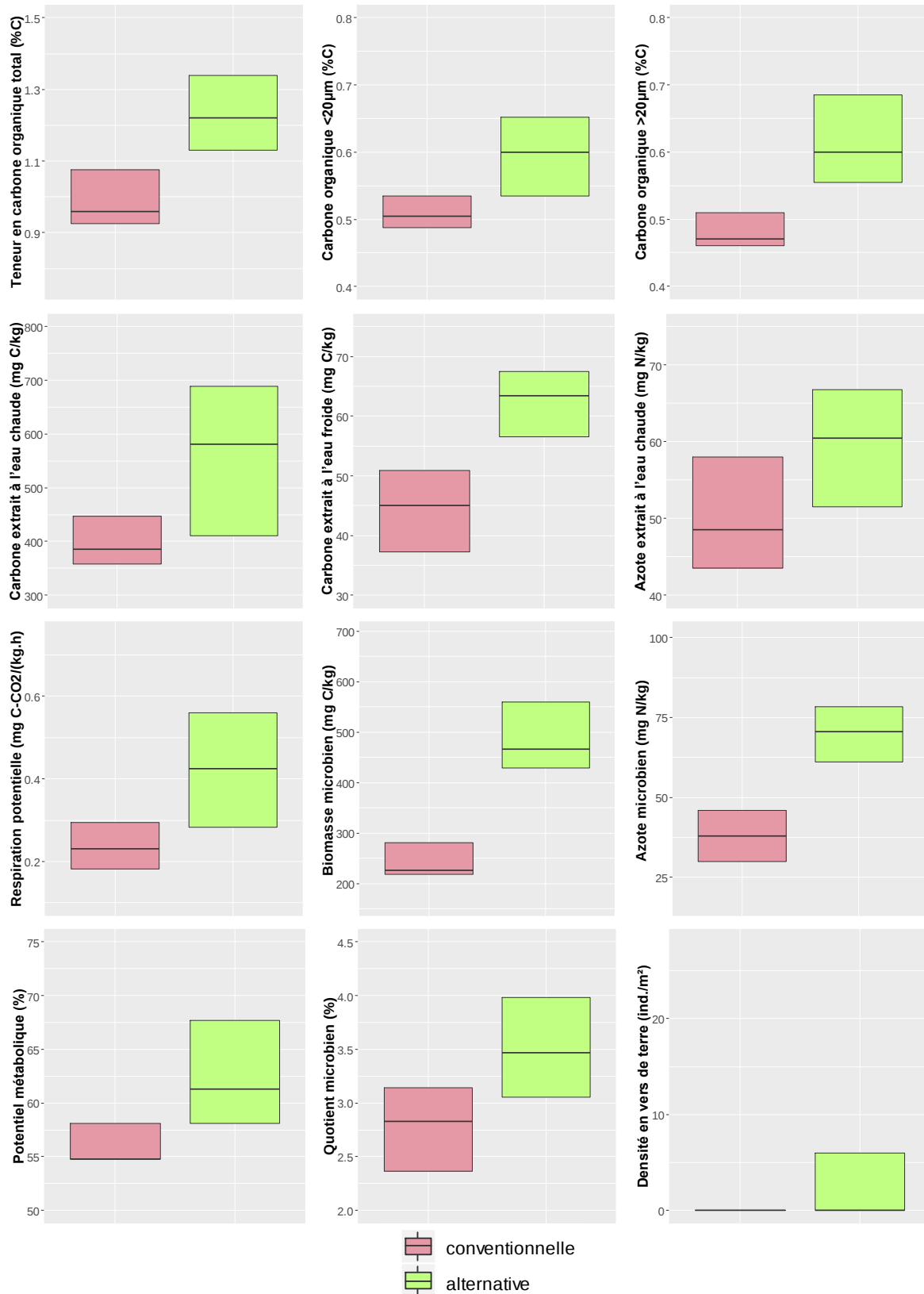


Figure 22 : Boîtes de Tukey des indicateurs présentant une différence significative entre les sols prélevés (en 2016) sous agriculture conventionnelle (en rose) et sous agriculture alternative (en vert).

Les teneurs en COT et en fraction grossière de carbone sont toujours plus élevées dans les sols sous agriculture alternative par rapport à l'agriculture conventionnelle. Sur les sites étudiés, l'agriculture biologique a montré des teneurs en COT et fraction grossière de carbone un peu plus élevées que l'agriculture de conservation, et ce en quelques années. La teneur en fraction fine de carbone organique augmente significativement dans le cas de l'agriculture de conservation et de l'agriculture biologique après ~10 années d'application.

Les valeurs des indicateurs sont toujours plus élevées pour les sols sous agriculture alternative par rapport à l'agriculture conventionnelle. Cet effet du type d'exploitation est plus important pour les indicateurs liés au renouvellement de la matière organique dans le sol (biomasse microbienne, respiration potentielle, quotient microbien). Il est à noter que le renouvellement de la matière organique est un processus important pour la fertilité du sol car il permet la libération des nutriments pour la croissance des plantes (Janzen, 2006).

Pour la minéralisation nette de l'azote, le quotient métabolique et le rapport C_{mic}/N_{mic} , il n'y a pas d'effet significatif du type d'exploitation dans les sites étudiés.

Globalement, ces premiers résultats indiquent une activité biologique plus importante dans les sols sous agriculture alternative (biologique et de conservation), comparés aux sols sous agriculture conventionnelle. Ceci pourrait être lié à une meilleure gestion de matières organiques (rétention/apport), menant potentiellement, à terme, à une meilleure fertilité du sol.

Effets des pratiques agricoles : études sur les essais à long terme du CRA-W

Afin de mesurer les effets de quelques pratiques agricoles sur les indicateurs biologiques et le carbone, des essais à long termes du CRA-W ont été choisis comme sites d'étude. Ainsi, la gestion des résidus de culture, le travail du sol et la fertilisation (en prairie) ont été étudiés en 2016 et 2017.

La gestion des résidus de culture est étudiée sur le site de Long-Tours depuis 1959 (Buysse *et al.*, 2013).. La rotation historique depuis 1984 est une rotation triennale betterave sucrière, froment d'hiver et escourgeon à l'exception d'une culture d'épeautre qui a remplacé le froment en 2010. Les différents traitements reçoivent les mêmes apports en fertilisants et sont labourés à une profondeur de 27 cm. Deux traitements ont été comparés ici. (1) Le traitement « **paille-CIPAN** » où les résidus de culture sont annuellement restitués dans la parcelle, ainsi que des feuilles et des collets de betterave depuis 2006, tous les 3 ans, et une interculture d'hiver est introduite avant la tête de rotation (betteraves). (2) Le traitement de « **contrôle** » où seule les feuilles et les collets de betterave sont laissés au champ depuis 2010 (tous les 3 ans), et aucune interculture n'est introduite.

Le travail du sol est étudié sur le site de Gentinnes depuis 2006 grâce à trois traitements différents. (1) Sur la parcelle « **labour** » est appliqué un labour annuel de 25-28 cm de profondeur. (2) La parcelle « **décompactage** » correspond à une alternance décompactage (de 30-32 cm) et l'utilisation d'un vibroculteur (12- 13 cm de profondeur) une année sur deux. (3) La parcelle « **TCS** » correspond à un travail superficiel réduit grâce à l'utilisation d'un vibroculteur tous les ans sur 12-13 cm de profondeur. Pour tous les traitements, le lit de semence est préparé avec une herse à disques à 5-8cm, et la rotation est de deux ans (betterave – céréales d'hiver). Une culture de moutarde en septembre entre la récolte des céréales et le semis de betteraves (avril de l'année suivante) et laissée pour se décomposer en surface. Les pailles de céréales sont broyées et incorporées dans le sol (Jonard *et al.*, 2013).

Différents schémas de fertilisation en prairies sont étudiés sur le site de Libramont. Depuis 1996, quatre blocs de 1.3 ha (sous-divisés en deux parcelles de 65 ares) ont été soumis chacun à un schéma de fertilisation contrasté, avec depuis 2010 une conversion à l'agriculture biologique. La prairie est composée de ray-grass anglais (50 %) et de trèfle blanc (40 %). Le pâturage annuel s'effectue en rotation avec un chargement moyen de 5 à 7 UGB ha⁻¹. L'excédent de production printanier est valorisé chaque année par la fauche et l'ensilage d'une parcelle dans chaque bloc. Les traitements sont, par bloc - (1) fumure organique (10 mg.ha⁻¹.an⁻¹) jusqu'en 2010, aucun amendement ou fertilisant depuis, (2) fertilisant minéral jusque 2010, aucun amendement ou fertilisant depuis, (3) fumure organique jusqu'en 2016 (10 Mg ha⁻¹.an⁻¹) année du prélèvement, et (4) fertilisant minéral jusqu'en 2010, et fumure organique (10 Mg ha⁻¹.an⁻¹) depuis.

Résultats et interprétations

Les indicateurs pour lesquels il y a un effet significatif de la pratique agricole dans les sites d'essais à long terme sont présentés dans le tableau 16.

Tableau 16- Effets des pratiques agricoles sur les indicateurs biologiques et le carbone des sites d'étude à long terme du CRA-W. Les sites de Long-Tours et de Libramont ont été échantillonnés en 2016 et celui de Gentinnes en 2017. Pour chaque modalité (pratique agricole), 4 échantillons ont été prélevés. Les moyennes sont représentées et des lettres différentes dans une colonne indiquent des différences significatives.

Sites d'étude à long terme	Pratique agricole	COT %	C<20µm %	C>20µm %	Cmic/Nmic sans unité	Qmic %	Test statistique
Long-Tours	Contrôle	0,84 b	0,61 a	0,23 b	7,26 a	2,66 a	Mann-Whitney
	paille-CIPAN	0,99 a	0,63 a	0,36 a	5,96 a	2,72 a	
Gentinnes	Labour	1,04 a	0,70 a	0,34 b	7,50 a	3,57 a	Kruskal-Wallis
	Décompactage	1,17 b	0,67 a	0,50 ab	8,55 a	3,45 a	
	TCS	1,23 b	0,68 a	0,56 a	5,91 b	2,77 b	
Libramont	fumure orga 2010	4,03 b	1,62 a	2,41 b	ND	ND	Kruskal-Wallis
	fertilisant min 2012	4,05 b	1,57 a	2,48 b	ND	ND	
	fumure orga 2016	4,66 a	1,61 a	3,06 a	ND	ND	
	fertilisant min 2012 et fumure orga 2016	4,32 b	1,84 a	2,48 b	ND	ND	

Corg=teneur en carbone organique total ; Corg<20µm=teneur en carbone organique dans la fraction fine, inférieure à 20µm ; Corg>20µm=teneur en carbone organique dans la fraction grossière, supérieure à 20µm ; Cmic/Nmic=rapport entre la teneur en carbone et en azote microbien ; Qmic= quotient microbien ; CIPAN - culture intermédiaire piège à nitrates (CIPAN) ; TCS=technique cultural simplifiée (vibroculqueur); fumure orga 2010 (ou 2016)=amendement de fumure organique jusqu'en 2010 (ou 2016) ; fertilisant min 2010 (ou 2016)=amendement de fertilisant minérale jusqu'en 2012 (ou 2016). ND=non disponible, ces indicateurs n'ont pas été mesurés.

Une restitution des résidus de culture associée à une CIPAN augmente significativement la teneur en carbone organique total. Cette augmentation est due en majeure partie à une augmentation de la fraction grossière C>20µm, et donc à l'apport régulier de carbone grossier (c'est-à-dire via la matière organique fraîche). La fraction fine a très peu augmenté malgré l'application du traitement depuis plusieurs décennies. Cette pratique seule ne semble donc pas suffisante afin d'améliorer de façon pérenne et efficace la matière organique dans un sol cultivé.

Les parcelles sous traitement de décompactage et de TCS sur l'essai de Gentinnes montrent des teneurs en COT significativement plus élevées que la parcelle sous labour conventionnel ; plus le traitement est superficiel et simplifié, plus les teneurs en COT sont importantes. Il en est de même pour la fraction grossière de carbone (C>20µm), avec une différence significative entre les sols labourés et ceux en TCS. La fraction fine de carbone (C<20µm) ne montre pas de différence significative entre traitements ; le processus de stabilisation d'une partie des apports excédentaires à l'origine labile n'est sûrement pas encore assez conséquent. On observe ici que la pratique de TCS sur ~10ans a permis une

augmentation des taux de COT et de C_{>20μm} plus importants que la restitution des résidus de cultures associés à une CIPAN sur le site de Longs-Tours depuis plusieurs décennies.

Le rapport C_{mic}/N_{mic} des bactéries, champignons et actinomycètes se situe de 5 à 10, avec des rapports plus faibles pour les bactéries (4–8) que pour les champignons (8–29). Le Q_{mic}, ratio de la biomasse microbienne et du carbone organique total du sol, est un indicateur de la disponibilité de ce carbone pour les micro-organismes. Des valeurs plus élevées indiquant une meilleure disponibilité. Sous TCS, nous observons un changement vers une dominance de bactéries (diminution significative du C_{mic}/N_{mic}) et une disponibilité de carbone moindre (diminution du Q_{mic}).

Sur le site de Libramont, consacré à l'étude des effets des amendements en prairies, les teneurs en COT et en fraction grossière de carbone s'avèrent significativement différentes entre traitements, ce qui n'est pas le cas pour la fraction fine de carbone. Ainsi, on observe que les teneurs en carbone de la fraction grossière (et également du COT) sont les plus élevées dans la parcelle amendée en fumure organique l'année du prélèvement, alors qu'elles sont les plus faibles pour la parcelle qui ne reçoit plus d'amendement depuis 2010. Malgré l'application de différents traitements depuis plus de 10 ans, la fraction fine n'évolue pas mais montre des teneurs importantes pour ce type de sol (Krüger *et al.*, 2018b). Cette importante et relativement constante teneur en fraction fine de carbone ainsi que cette haute proportion en fraction grossière de carbone pour ces sols ardennais argileux suggèrent qu'ils sont riches en C labile et qu'ils seraient proches de la saturation en C stable (Hassink, 1997 ; §4.4).

7 Références bibliographiques

- Abbott, L.K., Murphy, D. V., 2003. Soil biological fertility: a key to sustainable land use in agriculture. *Soil Biol. Fertil. a key to Sustain. L. use Agric.*
- Acton, D.F., Gregorich, L.J., 1995. Health of our soils. Centre for Land and Biological Resources Research.
- Allen, S., Grimshaw, H.M., Parkinson, J., Allen, E., 1989. Chemical analysis of ecological materials.
- Anderson, J., Domsch, K., 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.*
- 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, 251–255.
- Anderson, T.-H., Domsch, K.H., 1989. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biol. Biochem.* 21, 471–479.
- Anderson, T.-H., Domsch, K.H., 1985. Determination of ecophysiological maintenance carbon requirements of soil microorganisms in a dormant state. *Biol. Fertil. Soils* 1, 81–89.
- Baudron, F., Giller, K., 2014. Agriculture and nature: Trouble and strife? *Biol. Conserv.*
- Bending, G.D., Turner, M.K., Rayns, F., Marx, M.-C., Wood, M., 2004. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. *Soil Biol. Biochem.* 36, 1785–1792.
- Bispo, A., Cluzeau, D., Creamer, R., Dombos, M., Graefe, U., Krogh, P.P.H.H., Sousa, J.J.P., Peres, G., Rutgers, M., Winding, A., Römbke, J., Roembke, J., Bispo, A., Cluzeau, D., Creamer, R., Graefe, U., Krogh, P.P.H.H., Sousa, J.J.P., Peres, G., Rutgers, M., Winding, A., 2009. Indicators for Monitoring Soil Biodiversity. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 5, 717.
- Bispo, A., Guellier, C., Martin, É., Sapijanskas, J., Soubelet, H., Chenu, C., 2016. Les sols: Intégrer leur multifonctionnalité pour une gestion durable. Editions Quae.
- Bouché, M.B., 1972. Lombriciens de France: écologie et systématique, *Annales de Zoologie-Écologie animale*. Institut National de la Recherche Agronomique.
- Boyer, J., Reversat, G., Lavelle, P., Chabanne, A., 2013. Interactions between earthworms and plant-parasitic nematodes. *Eur. J. Soil Biol.* 59, 43–47.
- Braos, B.B., Ferreira, M.E., da Cruz, M.C.P., Braos, L.B., Barbosa, J.C., 2016. Mild and moderate extraction methods to assess potentially available soil organic nitrogen. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 40, 1–13.
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., 2018. Soil quality—A critical review. *Soil Biol. Biochem.* 120, 105–125.
- Bunning, S., Jiménez, J.J., 2003. Indicators and assessment of soil biodiversity/soil ecosystem functioning for farmers and governments, in: *Proceedings "OECD Expert Meeting on Soil Erosion and Soil Biodiversity Indicators"*, Rome. pp. 1–16.
- Buyse, P., Schnepf-Kiss, A.-C., Carnol, M., Malchair, S., Roisin, C., Aubinet, M., 2013. Fifty years of crop residue management have a limited impact on soil heterotrophic respiration. *Agric. For. Meteorol.* 180, 102–111.
- Carney, K.M., Hungate, B.A., Drake, B.G., Megonigal, J.P., 2007. Altered soil microbial community at elevated CO₂ leads to loss of soil carbon. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 4990–4995.
- Carpenter-Boggs, L., Kennedy, A.C., Reganold, J.P., 2000. Organic and Biodynamic Management : Effects on Soil Biology. *Soil Sci. Soc. Am.* 64, 1651–1659.
- Chartin, C., Krüger, I., Stevens, A., van Wesemael, B., Carnol, M., 2015. CARBIOSOL I - Carbone organique, biomasse et activité microbienne des sols: vers un indicateur de la qualité des sols en Wallonie.
- Chartin, C., Krüger, I., van Wesemael, B., Carnol, M., 2016. CARBIOSOL III - Carbone organique, biomasse et activité microbienne des sols: vers un indicateur de la qualité des sols en Wallonie.
- Chartin, C., Stevens, A., Goidts, E., Krüger, I., Carnol, M., van Wesemael, B., 2017. Mapping Soil Organic Carbon stocks and estimating uncertainties at the regional scale following a legacy sampling strategy (Southern Belgium, Wallonia). *Geoderma Reg.* 9, 73–86.
- Cleveland, C.C., Liptzin, D., 2007. C:N:P stoichiometry in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry* 85, 235–252.
- D'Hose, T., Cougnon, M., De Vlieghe, A., Vandecasteele, B., Viaene, N., Cornelis, W., Van Bockstaele, E.,

- Reheul, D., 2014. The positive relationship between soil quality and crop production: A case study on the effect of farm compost application. *Appl. Soil Ecol.* 75, 189–198.
- Dalal, R., 1998. Soil microbial biomass—what do the numbers really mean? *Anim. Prod. Sci.*
- Dalal, R.C., Chan, K.Y., 2001. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt. *Soil Res.* 39, 435–464.
- DGO3, 2017. Rapport sur l'état de l'environnement Wallon 2017.
- Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicsek, D.F., Stewart, B.A., Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and Assessing Soil Quality, in: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, pp. 1–21.
- Doran, J.W., Safley, M., 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. In "Biological Indicators of Soil Health", in: *Biological Indicators of Soil Health*. pp. 1–28.
- Doran, J.W., Zeiss, M.R., 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.* 15, 3–11.
- Duru, M., Therond, O., Martin, G., Martin-Clouaire, R., Magne, M.A., Justes, E., Journet, E.P., Aubertot, J.N., Savary, S., Bergez, J.E., Sarthou, J.P., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 1259–1281.
- Edwards, C.A., 1969. Soil Pollutants and Soil Animals. *Sci. Am.*
- Eijsackers, H., 2004. Leading concepts towards vital soil, in: *Developments in Soil Science*. Elsevier, pp. 1–20.
- Eisenhauer, N., 2010. The action of an animal ecosystem engineer: Identification of the main mechanisms of earthworm impacts on soil microarthropods. *Pedobiologia (Jena)*. 53, 343–352.
- Feng, W., Plante, A.F., Six, J., 2013. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry* 112, 81–93.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., others, 2005. Global consequences of land use. *Science* (80-.). 309, 570–574.
- Frąc, M., Oszust, K., Lipiec, J., 2012. Community Level Physiological Profiles (CLPP), Characterization and Microbial Activity of Soil Amended with Dairy Sewage Sludge. *Sensors (Basel)*. 12, 3253–3268.
- Gałązka, A., Gawryjolek, K., Grządziel, J., Frąc, M., Książak, J., 2017. Microbial community diversity and the interaction of soil under maize growth in different cultivation techniques. *Plant, Soil Environ.* 63, 264–270.
- García-Orenes, F., Guerrero, C., Roldán, A., Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Campoy, M., Zornoza, R., Bárcenas, G., Caravaca, F., 2010. Soil microbial biomass and activity under different agricultural management systems in a semiarid Mediterranean agroecosystem. *Soil Tillage Res.* 109, 110–115.
- Genot, V., Colinet, G., Bock, L., Vanvyve, D., Reusen, Y., Dardenne, P., 2011. Near infrared reflectance spectroscopy for estimating soil characteristics valuable in the diagnosis of soil fertility. *J. Near Infrared Spectrosc.* 19, 117–138.
- Germon, J.C., Taureau, J.C., Thomas, J.M., 1994. Effets des méthodes simplifiées de travail du sol sur les transformations de l'azote et leurs conséquences sur le lessivage des nitrates. *COLLOQUES-INRA* 125.
- Ghani, A., Dexter, M., Perrott, K.W., 2003. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biol. Biochem.* 35, 1231–1243.
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M.C., Seoane, S., 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.*
- Giller, K.E., Beare, M.H., Lavelle, P., Izac, A.-M., Swift, M.J., 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. *Appl. soil Ecol.* 6, 3–16.
- Goidts, E., van Wesemael, B., 2007. Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in Southern Belgium (1955-2005). *Geoderma* 141, 341–354.
- Goidts, E., Van Wesemael, B., Crucifix, M., 2009a. Magnitude and sources of uncertainties in soil organic carbon (SOC) stock assessments at various scales. *Eur. J. Soil Sci.* 60, 723–739.
- Goidts, E., Van Wesemael, B., Van Oost, K., 2009b. Driving forces of soil organic carbon evolution at the landscape and regional scale using data from a stratified soil monitoring. *Glob. Chang. Biol.* 15, 2981–3000.
- Gomez, E., Ferreras, L., Toresani, S., 2006. Soil bacterial functional diversity as influenced by organic amendment application. *Bioresour. Technol.* 97, 1484–1489.
- Gregorich, E.G., Monreal, C.M., Carter, M.R., Angers, D.A., Ellert, B.H., 1994. Towards a minimum data set

- to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74, 367–385.
- Güsewell, S., Gessner, M.O., 2009. N: P ratios influence litter decomposition and colonization by fungi and bacteria in microcosms. *Funct. Ecol.* 23, 211–219.
- Hart, S.C., Stark, J.M., Davidson, E.A., Firestone, M.K., Weaver, R.L., Angle, S., Bottomley, P., Bezdiecek, D., Smith, S., Tabatabai, A., 1994. Methods of soil analysis, part 2. Microbiological and biochemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wis* 985–1017.
- Hassink, J., 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil* 191, 77–87.
- Haynes, R.J., 2000. Interactions between soil organic matter status, cropping history, method of quantification and sample pretreatment and their effects on measured aggregate stability. *Biol. Fertil. Soils* 30, 270–275.
- Hole, D.G., Perkins, A.J., Wilson, J.D., Alexander, I.H., Grice, P. V., Evans, A.D., 2005. Does organic farming benefit biodiversity? *Biol. Conserv.* 122, 113–130.
- Hu, S., Chapin III, F.S., Firestone, M.K., Field, C.B., Chiariello, N.R., 2001. Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO₂. *Nature* 409, 188.
- Islam, M.R., Chauhan, P.S., Kim, Y., Kim, M., Sa, T., 2011. Community level functional diversity and enzyme activities in paddy soils under different long-term fertilizer management practices. *Biol. Fertil. Soils* 47, 599–604.
- ISO 10694, 1995. Qualité du sol -- Dosage du carbone organique et du carbone total après combustion sèche (analyse élémentaire).
- Janzen, H.H., 2006. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biol. Biochem.* 38, 419–424.
- Jenkinson, D.S., Brookes, P.C., Powlson, D.S., 2004. Measuring soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 36.
- Jenkinson, D.S., Ladd, J.N., 1981. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. *Soil Biochem.* 5, 415–471.
- Joergensen, R., Mueller, T., 1995. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the k_{EN} value. *Soil Biol. Fertil. a key to Sustain. L. use Agric.* 0717, 33–37.
- Joergensen, R.G., 1996. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the k_{EC} value. *Soil Biol. Biochem.* 28, 25–31.
- Jonard, F., Mahmoudzadeh, M., Roisin, C., Weihermüller, L., André, F., Minet, J., Vereecken, H., Lambot, S., 2013. Characterization of tillage effects on the spatial variation of soil properties using ground-penetrating radar and electromagnetic induction. *Geoderma* 207, 310–322.
- Juan, L.I., Zhao, B., Li, X., Jiang, R., Bing, S.H., 2008. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on microbial biomass, soil enzyme activities and soil fertility. *Agric. Sci. China* 7, 336–343.
- Karlen, D.L., Ditzler, C.A., Andrews, S.S., 2003. Soil quality: Why and how? *Geoderma* 114, 145–156.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E., 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4–10.
- Koch, A., Mcbratney, A., Adams, M., Field, D., Hill, R., Crawford, J., Minasny, B., Lal, R., Abbott, L., O'Donnell, A., Angers, D., Baldock, J., Barbier, E., Binkley, D., Parton, W., Wall, D.H., Bird, M., Bouma, J., Chenu, C., Flora, C.B., Goulding, K., Grunwald, S., Hempel, J., Jastrow, J., Lehmann, J., Lorenz, K., Morgan, C.L., Rice, C.W., Whitehead, D., Young, I., Zimmermann, M., 2013. Soil Security: Solving the Global Soil Crisis. *Glob. Policy* 4, 434–441.
- Kremen, C., Miles, A., 2012. Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs. *Ecol. Soc.* 17.
- Krüger, I., Chartin, C., Carnol, M., van Wesemael, B., 2018a. CARBIOSOL IV - Développement d'indicateurs de la qualité biologique et du carbone organique du sol pour l'évaluation de l'état des sols en Wallonie. Liège.
- Krüger, I., Chartin, C., Carnol, M., van Wesemael, B., 2015. CARBIOSOL II - Carbone organique, biomasse et activité microbienne des sols: vers un indicateur de la qualité des sols en Wallonie.
- Krüger, I., Chartin, C., van Wesemael, B., Carnol, M., 2018b. Defining a reference system for biological indicators of agricultural soil quality in Wallonia, Belgium. *Biol. Indic.* 95, 568–578.
- Krüger, I., Chartin, C., van Wesemael, B., Malchair, S., Carnol, M., 2017. Integrating biological indicators in a

- Soil Monitoring Network (SMN) to improve soil quality diagnosis – a case study in Southern Belgium (Wallonia). *Biotechnol. Agron. Soc. Env.* 21, 219–230.
- Lal, R., 2016. Soil health and carbon management. *Food Energy Secur.* 5, 212–222.
- Lal, R., 2009. Challenges and opportunities in soil organic matter research. *Eur. J. Soil Sci.* 60, 158–169.
- Larson, W., Pierce, F., 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. dl.sciencesocieties.org.
- Lavaud, A., 2010. Extraction et caractérisation de la matière organique soluble des horizons profonds d'un sol arable.
- Lavelle, P., Lattaud, C., Trigo, D., Barois, I., 1995. Mutualism and biodiversity in soils. *Plant Soil* 170, 23–33.
- Lawton, J.H., 1994. What Do Species Do in Ecosystems? *Oikos* 71, 367.
- Le Villio, M., Arrouays, D., Deslais, W., Daroussin, J., Bissonnais, Y. Le, 2001. Estimation des quantités de matière organique exogène nécessaires pour restaurer et entretenir les sols limoneux français à un niveau organique donné.
- Lechevallier, C., Planques, B., Salducci, X., 2004. Évaluer la dynamique biologique des sols.
- Leifeld, J., Siebert, S., Kögel-Knabner, I., 2002. Biological activity and organic matter mineralization of soils amended with biowaste composts. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 151–159.
- Letten, S., Van Orshoven, J., Perrin, D., Wesemael, B.V.A.N., Muys, B., 2008. Organic carbon stocks and stock changes of forest biomass in Belgium derived from forest inventory data in a spatially explicit approach. *Ann. For. Sci.* 65, 1.
- Malchair, S., Halen, H., Moutier, M., Carnol, M., 2010. Appreciation of biological indicators as tools for evaluating soil quality.
- Mangalassery, S., Mooney, S.J., Sparkes, D.L., Fraser, W.T., Sjögersten, S., 2015. Impacts of zero tillage on soil enzyme activities, microbial characteristics and organic matter functional chemistry in temperate soils. *Eur. J. Soil Biol.* 68, 9–17.
- Maraun, M., Scheu, S., 1999. Middens of the earthworm *Lumbricus terrestris* (Lumbricidae): microhabitats for micro- and mesofauna in forest soils. *Pedobiologia (Jena)* 43, 276–287.
- Martin, P., Somer, L., 2018. Panorama des filières bois-énergie et agrocombustibles en Wallonie, ValBiom.
- Mary, B., Beaudoin, N., Justes, E., Machet, J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *Eur. J. Soil Sci.* 50, 549–566.
- McGill, W.B., Hunt, H.W., Woodmansee, R.G., Reuss, J.O., 1981. Phoenix, a model of the dynamics of carbon and nitrogen in grassland soils, *Ecological Bulletins (Sweden)*. Swedish Natural Science Research Council.
- MEA, 2005. Ecosystems and human well-being: Synthesis, Millennium Ecosystem Assessment. Washington, DC.
- 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.
- Ménard, O., 2005. Les ouvriers du sol et les pratiques agricoles de conservation. CRAAQ.
- Minet, O., Ferber, F., Jacob, L., Lecler, B., Agneessens, R., Cugnon, T., Decruyenaere, V., Genot, V., Gofflot, S., Pitchugina, E., Planchon, V., Renneson, M., Sinnaeve, G., Wavreille, B., Dardenne, P., Baeten, V., 2016. REQUASUD - La spectroscopie proche infrarouge : une technologie rapide, précise et écologique pour déterminer la composition et la qualité des produits agricoles et alimentaires.
- Morvan, X., Saby, N.P.A., Arrouays, D., Le Bas, C., Jones, R.J.A., Verheijen, F.G.A., Bellamy, P.H., Stephens, M., Kibblewhite, M.G., 2008. Soil monitoring in Europe: A review of existing systems and requirements for harmonisation. *Sci. Total Environ.*
- N'Dayegamiye, A., 2007. La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO: facteur climatique et régies agricoles influençant les taux de minéralisation de l'azote. CRAAQ - Colloq. sur l'azote.
- Nortcliff, S., 2002. Standardisation of soil quality attributes. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88, 161–168.
- Pankhurst, C., Doube, B.M., Gupta, V., 1997. Biological indicators of soil health. *Cab International Wallingford*.
- Pankhurst, C.E., Ophel-Keller, K., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R., 1996. Biodiversity of soil microbial communities in agricultural systems. *Biodivers. Conserv.* 5, 197–209.

- Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J.-P., Chenu, C., Colnenne-David, C., De Cara, S., Delame, N., 2017. Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture. *Environ. Sci. Policy* 77, 130–139.
- Pelosi, C., Bertrand, M., Roger-Estrade, J., 2009. Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 287–295.
- Pelosi, C., Toutous, L., Chiron, F., Dubs, F., Hedde, M., Muratet, A., Ponge, J.F., Salmon, S., Makowski, D., 2013. Reduction of pesticide use can increase earthworm populations in wheat crops in a European temperate region. *Agric. Ecosyst. Environ.* 181, 223–230.
- Pérès, G., Vandenbulcke, F., Guernion, M., Hedde, M., Beguiristain, T., Douay, F., Houot, S., Piron, D., Richard, A., Bispo, A., Grand, C., Galsomies, L., Cluzeau, D., 2011. Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment: An example from the national Bioindicator programme. *Pedobiologia - Int. J. Soil Biol.* 54, S77–S87.
- Priha, O., Smolander, A., 1999. Nitrogen transformations in soil under *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* at two forest sites. *Soil Biol. Biochem.* 31, 965–977.
- Pulleman, M., Creamer, R., Hamer, U., Helder, J., Pelosi, C., Pérès, G., Rutgers, M., 2012. Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services-an overview of European approaches. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4, 529–538.
- Robert, M., Chenu, C., 1992. Interactions between soil minerals and microorganisms, in: *Soil Biochemistry*. pp. 307–404.
- Robertson, G.P., Coleman, D.C., Sollins, P., Bledsoe, C.S., 1999. Standard soil methods for long-term ecological research. Oxford University Press on Demand.
- Romig, D.E., Garlynd, M.J., Harris, R.F., 1996. Farmer-Based Assessment of Soil Quality: A Soil Health Scorecard 1. *Methods Assess. soil Qual.* 39–60.
- Schmidt, M.W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Trumbore, S.E., 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49–56.
- Schrumpf, M., Schumacher, J., Schöning, I., Schulze, E.-D., 2008. Monitoring Carbon Stock Changes in European Soils: Process Understanding and Sampling Strategies, in: Dolman, A.J., Valentini, R., Freibauer, A. (Eds.), *Ecological Studies*. Springer New York, pp. 153–189.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Deneff, K., 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79, 7–31.
- Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S.J., Gregorich, E.G., Paul, E.A., Paustian, K., 2002. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1981–1987.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1350–1358.
- Smith, J.L., Paul, E.A., 1990. The significance of soil microbial biomass estimations. *Soil Biochem. Vol. 6.* 357–396.
- Sparling, G., 1998. Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C. *Soil Biol.*
- SPW, DGO3, D., 2018. Composantes environnementales et liens environnement-santé. *Environnement physique : Régions agricoles*.
- Strickland, M.S., Rousk, J., 2010. Considering fungal:bacterial dominance in soils – Methods, controls, and ecosystem implications. *Soil Biol. Biochem.* 42, 1385–1395.
- Thomson, L.J., Hoffmann, A.A., 2007. Effects of ground cover (straw and compost) on the abundance of natural enemies and soil macro invertebrates in vineyards. *Agric. For. Entomol.* 9, 173–179.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*.
- Tiunov, A. V., Scheu, S., 1999. Microbial respiration, biomass, biovolume and nutrient status in burrow walls of *Lumbricus terrestris* L. (Lumbricidae). *Soil Biol. Biochem.* 31, 2039–2048.
- Tóth, G., Stolbovoy, V., Montanarella, L., European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability., 2007. Soil quality and sustainability evaluation : an integrated approach to support soil-related policies in the European Union: a JRC position paper. Publications

Office.

- Trigalet, S., Chartin, C., Krüger, I., Carnol, M., Oost, K. Van, Van Wesemael, B., 2017. Soil organic carbon fractionation for improving agricultural soil quality assessment – a case study in Southern Belgium (Wallonia). *Biotechnol. Agron. Soc. Env.* 21, 191–200.
- Tsiafouli, M.A., Thébault, E., Sgardelis, S.P., De Ruiter, P.C., Van Der Putten, W.H., Birkhofer, K., Hemerik, L., De Vries, F.T., Bardgett, R.D., Brady, M.V., 2015. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Glob. Chang. Biol.* 21, 973–985.
- Van-Camp, L., Bujarrabal, B., Gentile, A.R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazabal, C., Selvaradjou, S., 2004. Reports of the technical working groups established under the thematic strategy for soil protection [WWW Document]. Off. Off. Publ. Eur. Communities Luxemb. Gd. Luxemb. En ligne. <http://ec.europa.eu>.
- Van-Camp, L., Bujarrabal, B., Gentile, A.R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazabal, C., Selvaradjou, S.K., 2004. Organic Matter and Biodiversity. Reports Tech. Work. groups Establ. under Themat. Strateg. soil Prot. 3, 311–496.
- van Capelle, C., Schrader, S., Brunotte, J., 2012. Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota - A review with a focus on German data. *Eur. J. Soil Biol.* 50, 165–181.
- van Diepeningen, A.D., de Vos, O.J., Korthals, G.W., van Bruggen, A.H.C., 2006. Effects of organic versus conventional management on chemical and biological parameters in agricultural soils. *Appl. Soil Ecol.* 31, 120–135.
- van Leeuwen, J.P., Djukic, I., Bloem, J., Lehtinen, T., Hemerik, L., de Ruiter, P.C., Lair, G.J., 2017. Effects of land use on soil microbial biomass, activity and community structure at different soil depths in the Danube floodplain. *Eur. J. Soil Biol.* 79, 14–20.
- van Leeuwen, J.P., Lehtinen, T., Lair, G.J., Bloem, J., Hemerik, L., Ragnarsdóttir, K. V, Gísladóttir, G., Newton, J.S., de Ruiter, P.C., 2015. An ecosystem approach to assess soil quality in organically and conventionally managed farms in Iceland and Austria. *Soil* 1, 83–101.
- van Wesemael, B., Chartin, C., Wiesmeier, M., von Lützow, M., Hobley, E., Carnol, M., Krüger, I., Campion, M., Roisin, C., Hennart, S., Kögel Knabner, I., 2019. An indicator for organic matter dynamics in temperate agricultural soils. *Agric. Ecosyst. Environ.* 274, 62–75.
- Violle, C., Navas, M.L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., Garnier, E., 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos* 116, 882–892.
- von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., Marschner, B., 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biol. Biochem.* 39, 2183–2207.
- Wallace, K.J., 2007. Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biol. Conserv.* 139, 235–246.
- Walle, I. Vande, Van Camp, N., Perrin, D., Lemeur, R., Verheyen, K., Van Wesemael, B., Laitat, E., 2005. Growing stock-based assessment of the carbon stock in the Belgian forest biomass. *Ann. For. Sci.* 62, 853–864.
- Warkentin, B.P., 1995. The changing concept of soil quality, *Journal of soil and water conservation*. Soil and Water Conservation Society.
- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., Peigné, J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 1–20.
- Wiesmeier, M., Hübner, R., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., Von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., 2014. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation. *Glob. Chang. Biol.* 20, 653–665.
- Wood, M., Litterick, A.M., 2017. Soil health - What should the doctor order? *Soil Use Manag.* 33, 339–345.

ANNEXE 2 :

Canevas de présentation des données

« CARBIOSOL : Indicateurs biologiques et carbone organique des sols agricoles wallons »



Base de données « CARBIOSOL :
Indicateurs biologiques et carbone organique des sols
agricoles wallons »

—

Canevas de présentation des données

Mars 2019

Quentin Vincent (ULiège), Caroline Chartin (UCL),
Bas van Wesemael (UCL) et Monique Carnol (ULiège)

(quentin.vincent@uliege.be; caroline.chartin@uclouvain.be;
bas.vanwesemael@uclouvain.be; m.carnol@uliege.be)

Sur base des documents officiels fournis par REQUASUD

Université de Liège – Laboratoire d'écologie végétale et microbienne
Chemin de la vallée, 4
4000 LIEGE
Tél. : (32) 4 3663845

1. Préambule

1.1. CONTEXTE DE LA CRÉATION DE LA BASE DE DONNÉES

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 soumise à de nombreuses pressions, il s'avère 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. gestion agricole). Ce fut le **but du projet de recherche CARBIOSOL** (Juillet 2013-Janvier 2019, financement SPW-DGO3).

Le **Carbone Organique du Sol (COS)** est associé à différents processus physiques, chimiques et biologiques du sol. Il est l'indicateur 'classique' de suivi de qualité des sols. En Wallonie, le COS est mesuré systématiquement lors des analyses de sols effectuées via les laboratoires de REQUASUD, et un réseau de surveillance est consacré au suivi de ses stocks dans les sols agricoles, i.e. le réseau CARBIOSOL (Réseau CARBIOSOL ; Goidts, 2009 ; Chartin et al., 2017). Cependant, la dynamique du COS est lente et ses changements ne sont détectables qu'après plusieurs années ou décennies. De nouveaux indicateurs, plus réactifs et complémentaires, ont donc été sélectionnés dans le cadre du projet CARBIOSOL :

- La **séparation du COS en deux fractions** aide à démêler les tendances à long terme dans la stabilisation de la matière organique (fraction < 20µm) des processus liés à sa minéralisation et au taux de renouvellement des nutriments (fraction > 20µm, incluant le C labile).
- Des **indicateurs biologiques** (respiration potentielle, biomasse microbienne, minéralisation nette de l'azote, potentiel métabolique des bactéries, vers de terre, quotients microbien et métabolique) fournissent des informations complémentaires par rapport à l'activité des micro-organismes et à la diversité métabolique des organismes impliqués dans la minéralisation de la matière organique.

Les indicateurs ci-dessus peuvent non seulement **améliorer le suivi de la qualité du sol** à l'échelle régionale, mais également fournir des **informations supplémentaires aux agriculteurs** pour leur gestion au niveau parcellaire. Des exemples concrets d'utilisation de ces différents indicateurs, ainsi que les méthodes analytiques associées, sont proposés dans la brochure intitulée « La qualité biologique des sols agricoles en Wallonie ».

Une **analyse et synthèse de l'ensemble des résultats du projet CARBIOSOL** a été réalisée. Une **première base de données (BDD)** - « CARBIOSOL – indicateurs biologiques et carbone organique des sols agricoles wallons » - comprend l'ensemble des valeurs des indicateurs biologiques et des données liées au COS collectées au cours du projet. Cette BDD est hébergée sur un serveur de l'université de Liège et n'est **pas évolutive**, i.e. aucune donnée ne peut y être ajoutée. Les données de la BDD CARBIOSOL servent également de base de valeurs de référence de la **BDD évolutive** - « RÉFÉRENTIEL wallon de la qualité biologique des sols agricoles » - **hébergée et gérée par les partenaires de REQUASUD** (réf. canevas REFERENTIEL) afin d'avoir des gammes de valeurs.

Ce document constitue le canevas de présentation des données de la BDD « CARBIOSOL ». Pour accéder à cette base de données, connectez-vous sur le serveur de l'Université de Liège www.carbiosol.uliege.be. L'accès est à demander via un formulaire.

1.2. INFORMATIONS SUR LA BASE DE DONNÉES

- La présente BDD est sous format **csv** et est actuellement stockée sur un serveur de l'Université de Liège.
- La base de données est accessible par le lien suivant : **www.carbiosol.uliege.be**
L'accès à la base de données est limité par un **mot de passe** à demander via un formulaire sur le site web.
- Certains champs ont des noms différents entre la BDD « CARBIOSOL » et la BDD « Référentiel ». Il s'agit des suivants :
 - « ID_ECHANTILLON » est présentée sous le terme « N°ANALYSE » dans la BDD REFERENTIEL ;
 - « EXPLOITATION » est présentée sous le terme « Type d'exploitation » dans la BDD REFERENTIEL ;
 - « CULTURE_PRELEVEMENT » est présenté sous le terme « CULTURE ANNEE 0 » dans la BDD REFERENTIEL ;
 - « PH_KCL » et « PH_EAU » sont présenté sous le terme « pHKCl » et « pHeau » dans la BDD REFERENTIEL.

2. Structure de la base de données

	Intitulé	Description et remarques	Type de données		Nombre de décimales	Unités	Tables associées	Champs obligatoires
SIGNALYTIQUE	ID_SUBVENTION	Identifiant de la subvention	Chaîne de caractères	varchar(11)				OUI
	ID_ECHANTILLON	Identifiant numérique unique de l'échantillon	Chaîne de caractères	int(3)				OUI
	NOM_ECHANTILLON	Nom de l'échantillon utilisé lors des campagnes d'échantillonnage	Chaîne de caractères	varchar(7)				OUI
	PERIODE_ECHANTILLON	Période d'échantillonnage	Ex : aout-16	varchar(7)			TABLE_PERIODE_ECHANTILLON	OUI
	ANNEE_ECHANTILLON	Année de l'échantillonnage	Numérique : AAAA	int(4)				OUI
	OCCUPATION	Occupation du sol au moment du prélèvement	Chaîne de caractères	varchar(7)			TABLE_OCCUPATION	OUI
	CULTURE_PRELEVEMENT	Culture au moment du prélèvement	Chaîne de caractères	varchar(14)			TABLE_CULTURE_PRELEVEMENT	NON
	ID_SITE	Identifiant du site de prélèvement	Chaîne de caractères	varchar(3)				NON
	REGION_AGRICOLE	Régions agricoles wallonnes, définies selon leurs caractéristiques naturelles et de leur potentiel agro-économique ¹	Chaîne de caractères	varchar(16)			TABLE_REGION_AGRICOLE	OUI
	COORDONNEE_X	Longitude en projection lambert 72	Numérique	int(6)	0	m		NON
	COORDONNEE_Y	Latitude en projection lambert 72	Numérique	int(6)	0	m		NON
	REPETITION	Numéro de la répétition	Numérique	varchar(2)				NON
	EXPLOITATION	Type d'exploitation des cultures (mode de gestion)	Chaîne de caractères	varchar(21)			TABLE_EXPLOITATION	OUI
	PRATIQUE_AGRICOLE	Type de pratique agricole (TCS, paille-CIPAN etc.)	Chaîne de caractères	varchar(12)			TABLE_PRATIQUE_AGRICOLE	NON
	ANNEE_CONVERSION	Année de conversion en agriculture biologique	Numérique : AAAA	varchar(4)	0		TABLE_ANNEE_CONVERSION	NON
ANALYTIQUE	PH_KCL	pH mesuré au KCl	Numérique	varchar(4)	2	/	TABLE_METHODE	NON
	PH_H2O	pH mesuré à l'eau	Numérique	varchar(4)	2	/		NON
	C_ORGA	carbone organique total du sol	Numérique	varchar(4)	2	gC/100g		NON
	C_ORGA_INF20	carbone dans la fraction inférieure à 20µm du sol	Numérique	varchar(4)	2	gC/100g		NON
	C_ORGA_SUP20	carbone dans la fraction supérieure à 20µm du sol	Numérique	varchar(4)	2	gC/100g		NON
	C_EAU_FROIDE	carbone extrait à l'eau froide	Numérique	varchar(5)	1	mg C.kg-1		NON
	C_EAU_CHAUDE	carbone extrait à l'eau chaude	Numérique	varchar(6)	1	mg C.kg-1		NON
	N_EAU_FROIDE	azote extrait à l'eau froide	Numérique	varchar(5)	1	mg N.kg-1		NON
	N_EAU_CHAUDE	azote extrait à l'eau chaude	Numérique	varchar(5)	1	mg N.kg-1		NON
	N_TOTAL	azote total du sol	Numérique	varchar(4)	2	‰		NON
	C_ORGA_N_TOTAL	ratio carbone organique/azote total	Numérique	varchar(4)	1	/		NON
	C_MIC	carbone dans la biomasse microbienne (carbone microbien, biomasse microbienne)	Numérique	varchar(4)	0	mg C.kg-1		NON
	N_MIC	azote dans la biomasse microbienne (azote microbien)	Numérique	varchar(3)	0	mg N.kg-1		NON
	C_MIC_N_MIC	ratio carbone microbien/azote microbien	Numérique	varchar(4)	1	/		NON

P_RESPIRATION	potentiel de respiration du sol	Numérique	varchar(4)	2	mg C-CO ₂ . kg-1.h-1	NON
P_METABOLIQUE	potentiel métabolique microbien	Numérique	varchar(4)	1	%	NON
N_MINERALISATION	minéralisation nette de l'azote	Numérique	varchar(5)	2	mg N.kg-1.j-1	NON
Q_METABOLIQUE	quotient métabolique	Numérique	varchar(4)	2	mg C-CO ₂ . kg-1 C. h-1	NON
Q_MICROBIEN	quotient microbien	Numérique	varchar(5)	2	%	NON
LOMBRIC_DENS	densité de lombrics	Numérique	varchar(3)	0	individus. m-2	NON
LOMBRIC_MASS	masse de lombrics	Numérique	varchar(3)	0	g.m-2	NON

¹. <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/PHYS%205.html>

✓ **PERIODE_ECHANTILLON : PÉRIODE D'ÉCHANTILLONNAGE**

PERIODE_ECHANTILLON
oct-13
nov-13
mars-14
avr-14
mai-14
avr-15
mai-15
juin-15
avr-16
juin-16
aout-16
oct-16
Nov-16
juin-17

✓ **OCCUPATION : OCCUPATION DU SOL**

OCCUPATION
culture
prairie

✓ **EXPLOITATION : EXPLOITATION DU SOL**

EXPLOITATION
conventionnelle
biologique
conversion_biologique
conservation

✓ PRATIQUE_AGRICOLE : TYPE DE PRATIQUE AGRICOLE

PRATIQUE_AGRICOLE
TCS
NL_LO
NA
prairie_fauchee_temporaire
prairie_fauchee_permanente
prairie_paturee

NL_LO : Non labour, labour occasionnel

TCS : Techniques culturales simplifiées

NA : *Non available*

✓ CULTURE_PRELEVEMENT : TYPE DE CULTURE LORS DU PRELEVEMENT

CULTURE
betterave
mais
luz-tref-fet
petit_pois
potiron
pomme_de_terre
froment
herbe
NA

NA : *Non available*

✓ REGION_AGRICOLE : TYPE DE REGION AGRICOLE

REGION_AGRICOLE
ardenne
condroz
famenne
haute-ardenne
jurassique
limoneuse
region_herbagere
sablo-limoneuse

✓ ANNEE_CONVERSION : ANNÉE DE CONVERSION EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE

ANNEE_CONVERSION
1991
2002
2009
2016
2017
NA

NA : Non available

✓ METHODE : DESCRIPTION DES METHODES EMPLOYEES
DANS LE PROGRAMME CARBIOSOL

INDICATEUR	DESSCRIPTIF METHODE	PROFONDEUR D'ECHANTILLONNAGE
PH_KCL	ISO 10390:2005	0-10cm
PH_H2O	ISO 10390:2005	0-10cm
C_ORGA	ISO 10694:1995(fr)	0-10cm en prairie et 0-20cm en culture
C_ORGA_INF20	ISO 10694:1995(fr)	0-10cm en prairie et 0-20cm en culture
C_ORGA_SUP20	ISO 10694:1995(fr)	0-10cm en prairie et 0-20cm en culture
C_EAU_FROIDE	cf. brochure	0-10cm
C_EAU_CHAUDE	cf. brochure	0-10cm
N_EAU_FROIDE	cf. brochure	0-10cm
N_EAU_CHAUDE	cf. brochure	0-10cm
N_TOTAL	ISO 13878:1998	0-10cm
C_ORGA_N_TOTAL	Calculé – cf. brochure	/
C_MIC	ISO 14240-2:1997	0-10cm
N_MIC	ISO 14240-2:1997	0-10cm
C_MIC_N_MIC	ISO 14240-2:1997	0-10cm
P_RESPIRATION	ISO 16072:2002(fr)	0-10cm
P_METABOLIQUE	Frąc et al., 2012	0-10cm
N_MINERALISATION	ISO 14238:2012	0-10cm
Q_METABOLIQUE	Calculé – cf. brochure	/
Q_MICROBIEN	Calculé – cf. brochure	/
LOMBRIC_DENS	Protocole adapté de la norme ISO 23611-1:2018 – cf. brochure	Quadrat 60 × 30 cm (L × l)
LOMBRIC_MASS	protocole adapté de la norme ISO 23611-1:2018 – cf. brochure	Quadrat 60 × 30 cm (L × l)

ANNEXE 3 :

Canevas de présentation des données

« REFERENTIEL wallon de la qualité biologique des
sols agricoles »



Base de données
« REFERENTIEL wallon de la qualité biologique
des sols agricoles »

—
Canevas de présentation des données

Janvier 2019

Quentin Vincent (ULiège), Caroline Chartin (UCL), Monique Carnol (ULiège), Bas van Wesemael (UCL), Florence Ferber (REQUASUD), Clémence Mariage (ULiège / Gembloux AgrobioTech), Viviane Planchon (REQUASUD/CRA-W)

(quentin.vincent@uliege.be; caroline.chartin@uclouvain.be; m.carnol@uliege.be;
bas.vanwesemael@uclouvain.be; f.ferber@cra.wallonie.be; clemence.mariage@uliege.be;
v.planchon@cra.wallonie.be)

Sur base des documents officiels fournis par **REQUASUD**

ASBL REQUASUD

Rue de Liroux, 9

5030 GEMBLoux

Tél. 081/87. 58.96

E-mail : requasud@cra.wallonie.be

1. Préambule

1.1. CONTEXTE DE LA CRÉATION DE LA BASE DE DONNÉES

La **qualité du sol** a été définie comme «**La capacité d'un type de sol spécifique à fonctionner**, dans les limites d'un écosystème naturel ou géré, pour maintenir la productivité des plantes et des animaux, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air, et soutenir la santé et l'habitation humaines» (Karlen *et al.*, 1997). Or, les sols sont considérés comme une ressource non renouvelable à l'échelle des générations humaines (Lal, 2009). Une prise de conscience de l'ampleur des effets des activités humaines sur les sols a mené les décideurs à élaborer des **outils pour le suivi de la qualité des sols**, afin d'évaluer et de surveiller l'évolution de la qualité des sols, de limiter leur dégradation et de favoriser des pratiques qui permettent une utilisation durable des sols. C'est dans ce cadre qu'est né le **projet de recherche CARBIOSOL** (juillet 2013 – janvier 2019, financement SPW-DGO3).

Parmi ces outils d'évaluation de la qualité des sols, le **carbone organique totale du sol (COT)** est une mesure fondamentale, liée à différents processus physiques, chimiques et biologiques du sol. En Wallonie, il est mesuré systématiquement lors des analyses de sols effectuées via les laboratoires de REQUASUD, mais également grâce au réseau de surveillance CARBOSOL (Goidts *et al.*, 2009), consacré au suivi des stocks de COT dans les sols agricoles. Cependant, la dynamique du COT est lente et ses changements ne sont détectables qu'après plusieurs années ou décennies (Goidts and van Wesemael, 2007). De plus, le carbone organique du sol n'est nullement homogène (von Lützow *et al.*, 2007). Ainsi, de nouveaux indicateurs, plus réactifs et complémentaires, ont été sélectionnés et mesurés dans le cadre du projet CARBIOSOL :

- La mesure de **deux fractions du carbone organique** aide à distinguer les tendances à long terme (taux de renouvellement de 100 ans ou plus), importants pour la stabilisation de la matière organique (fraction < 20µm) des processus liés à la transformation de la matière organique, impliqués dans la fertilité actuelle des sols (fraction > 20µm) (Trigalet *et al.*, 2017; van Wesemael *et al.*, 2019);
- Les organismes du sol interviennent directement dans la dégradation de la matière organique, et leur activité est par conséquent liée à la libération des éléments nutritifs. Ces **indicateurs biologiques** (respiration potentielle, biomasse microbienne, minéralisation nette de l'azote, potentiel métabolique des bactéries, vers de terre, quotients microbien et métabolique) fournissent des informations complémentaires au COT (Krüger *et al.*, 2017, 2018b).

Les indicateurs ci-dessus peuvent non seulement **améliorer le suivi de la qualité du sol** à l'échelle régionale, mais également fournir des **informations supplémentaires aux agriculteurs** pour leur gestion au niveau parcellaire. Des exemples concrets d'utilisation de ces différents indicateurs, ainsi que les méthodes analytiques associées, sont proposés dans la brochure intitulée « La qualité biologique des sols agricoles en Wallonie ». Une **analyse et synthèse de l'ensemble des résultats du projet CARBIOSOL** a été réalisée. Une **première base de données (BDD)** - « **CARBIOSOL** – indicateurs biologiques et carbone organique des sols agricoles wallons » - comprend l'ensemble des valeurs des indicateurs biologiques et des données liées au COS collectées au cours du projet. Cette BDD est

hébergée sur un serveur de l'université de Liège et n'est **pas évolutive**, i.e. aucune donnée ne peut y être ajoutée.

Une **deuxième base de données** - « **RÉFÉRENTIEL** wallon de la qualité biologique des sols agricoles » - a été construit comme **partie intégrante de la BDD centralisée REQUASUD**, et est de ce fait hébergée, gérée et alimentée par l'asbl REQUASUD. Cette initiative s'intègre dans le processus de future mise à disposition pour les agriculteurs/particuliers de la mesure des indicateurs biologiques et fractions de carbone par les laboratoires du réseau REQUASUD. Les données obtenues lors du projet de recherche CARBIOSOL seront les premières données implémentées dans le « **RÉFÉRENTIEL** » et serviront à calibrer les mesures obtenues par la suite par les laboratoires. **Le « RÉFÉRENTIEL » vous est présenté dans ce document.**

INFORMATIONS RELATIVES A L'IMPLEMENTATION DE LA BASE DE DONNEES :

- Lorsque deux échantillons différents (par ex. un échantillon de 20cm de profondeur pour l'analyse du carbone et un autre de 10cm de profondeur pour l'analyse des indicateurs biologiques) proviennent du même point d'échantillonnage (géolocalisation identique), le laboratoire doit fusionner les deux échantillons afin d'avoir une seule ligne ; Pour cela, la nouvelle signalétique est la fusion des noms des échantillons, séparée par un tiret bas « _ ».
- Deux attributs, inexistant dans la BDD Requasud, sont à ajouter :
 - « Conservation » dans la table « BIO »
 - « Potiron » dans la table « SOL3 »
- Une table précisant les limites de validation des données a été envoyée le 21/01/2019 à REQUASUD (Julien Tuyls et Clémence Mariage) sous format SQL. Cette table présente les valeurs minimum (quantile de 5%) et maximum (quantile de 95%) pour chaque indicateur, selon des critères imposés par REQUASUD (la région agricole, l'occupation du sol et le type d'exploitation). Ainsi, les quantiles de 5% et 95% sont différents entre les prairies et les cultures. Pour les autres occupations de sols non présentes dans la BDD REFÉRENTIEL, le quantile de 5% correspond au minimum des deux quantiles de 5% des cultures et prairies et celui de 95% correspond au maximum des deux quantiles de 95% des cultures et prairies, afin d'avoir une gamme de validation la plus large possible pour ces sols.

2. Structure des fichiers

	Colonne Excel	Intitulé	Description et remarques	Type de données	Nombre de décimales	Unités	Tables associées	Champs obligatoires
SIGNALÉTIQUE	1	A	sol_analyse	N° propre au laboratoire	Chaine de caractères			OUI
	2	B	sol_cp	Du lieu de prélèvement	Numérique			OUI
	3	C	sol_geoid	Issu de REQUACARTO	Alphanumérique 14 caractères		REQUA CARTO	NON
	4	D	sol_date	Période d'échantillonnage	Date : AAAA-MM-JJ			OUI
	5	E	sol1_code	Texture observée sur le terrain	Numérique		SOL1	NON
	6	F	sol2_code	Occupation du sol au moment du prélèvement	Numérique		SOL2	OUI
	7	G	sol3_code_2	Type de culture lors de la 2 ^{ème} année avant le prélèvement	Numérique		SOL3	NON
	8	H	sol3_code_1	Type de culture lors de la 1 ^{ère} année avant le prélèvement	Numérique		SOL3	NON
	9	I	sol3_code_0	Type de culture lors du prélèvement	Numérique		SOL3	OUI
	10	J	sol_x	Longitude en projection lambert 72	Numérique	0	m	NON
	11	K	sol_y	Latitude en projection lambert 72	Numérique	0	m	NON
	12	L	sol_superficie	De la zone de prélèvement ou de la parcelle	Numérique	1	ha	NON
	13	M	sol_profondeur	Profondeur d'échantillonnage	Numérique	0	cm	OUI
	14	N	sol_profondeur_IB	Profondeur d'échantillonnage des indicateurs biologiques	Numérique	0	cm	OUI
	15	O	sol_profondeur_lombric	Profondeur d'échantillonnage des lombrics	Numérique	0	cm	OUI
ANALYTIQUE	16	P	sol_bio	Type d'exploitation des cultures (mode de gestion)	Numérique		BIO	OUI
	17	Q	sol_carbone	Carbone organique total du sol	Numérique	2	% m.s.	NON
	18	R	sol_carbone_inf20	Carbone dans la fraction inférieure à 20µm du sol	Numérique	2	% m.s.	NON
	19	S	sol_carbone_sup20	Carbone dans la fraction supérieure à 20µm du sol	Numérique	2	% m.s.	NON
	20	T	sol_c_eau_froide	Carbone extrait à l'eau froide	Numérique	1	mg C/kg	NON
	21	U	sol_c_eau_chaude	Carbone extrait à l'eau chaude	Numérique	1	mg C/kg	NON
	22	V	sol_n_eau_froide	Azote extrait à l'eau froide	Numérique	1	mg N/kg	NON
	23	W	sol_n_eau_chaude	Azote extrait à l'eau chaude	Numérique	1	mg N/kg	NON
	24	X	sol_c_mic	Carbone dans la biomasse microbienne (carbone microbien, biomasse microbienne)	Numérique	0	mg C/kg	NON
	25	Y	sol_n_mic	Azote dans la biomasse microbienne (azote microbien)	Numérique	0	mg N/kg	NON
	26	Z	sol_p_respiration	Potentiel de respiration du sol	Numérique	2	mg C-CO2/(kg.h)	NON
	27	AA	sol_p_metabolique	Potentiel métabolique microbien	Numérique	1	%	NON
	28	AB	sol_n_mineralisation	Minéralisation nette de l'azote	Numérique	2	mg N/(kg.j)	NON
	29	AC	sol_lombric_dens	Densité de lombrics	Numérique	0	individus/m²	NON
	30	AD	sol_lombric_mass	Masse de lombrics	Numérique	0	g/m²	NON

✓ SOL1 : TEXTURE DU SOL

NOUVEAU			ANCIEN	
sol1_code	Texture	Symbole de la CNSW	Code	Texture
E	Sols argileux légers	E	100	Sol argileux
			110	Argile
			120	Argile légère
			150	Argile sableuse
			170	Argile limoneuse
U	Sols argileux lourds	U	130	Argile lourde
			140	Argile très lourde
			160	Argile lourde sableuse
A	Sols limoneux	A	200	Sol limoneux
			210	Limon
			220	Limon léger
			230	Limon lourd
L	Sols sablo-limoneux	L	240	Limon sableux
P	Sols sablo-limoneux légers	P	260	Limon sableux lourd
Z	Sols sableux	Z	250	Limon sableux léger
S	Sols limono-sableux	S	310	Sable
			320	Sable limoneux
			330	Sable argileux

✓ SOL2 : OCCUPATION DU SOL

sol2_code	occupation du sol
110	Cultures en rotation
120	Prairie permanente
121	Prairie permanente pâturée
122	Prairie permanente mixte
123	Prairie permanente fauchée
124	Verger pâturé
130	Prairie temporaire
140	MAE
150	Jachère
160	Culture énergétique
210	Fruiticulture
211	Fruiticulture à l'extérieur
212	Fruiticulture en serre
220	Maraîchage
221	Maraîchage à l'extérieur
222	Maraîchage en serre
230	Potager amateur
231	Potager amateur à l'extérieur
232	Potager amateur en serre
240	Floriculture
241	Floriculture à l'extérieur
242	Floriculture en serre
250	Arboriculture ornementale
310	Peuplement forestier
330	Coupe forestière
340	Pépinière forestière
350	Sapin de Noël
410	Pelouse d'ornement
420	Terrain de sport
430	Gagnage
440	Fagne

✓ SOL3 : TYPE DE CULTURE

sol3_code	0_code	type de culture
101		Froment
102		Froment d'hiver
103		Froment de printemps
104		Froment d'hiver (fourrages)
105		Froment d'hiver (panification)
106		Froment de printemps (fourrages)
107		Froment de printemps (panification)
110		Orge
111		Orge d'hiver
112		Orge de printemps
120		Avoine
121		Avoine d'hiver
122		Avoine de printemps
130		Maïs en grain
140		Seigle
145		Epeautre
150		Triticale
160		Autres grains
210		Graminées
211		Ray-grass
220		Légumineuses
221		Trèfles
222		Luzerne
223		Fèves, Féverole et pois protéagineux
224		Vesces
230		Mélange de graminées et légumineuses
235		Mélange de prairie indéterminée
240		Maïs fourrage
245		Méteil
250		Choux et colza fourrager
260		Carotte fourragère
270		Betterave fourragère
310		Légumes 'bulbes' : oignon/poireau
315		Légumes 'racines' : bett./carotte
320		Légumes 'foliacés' : laitue/scarole/épinard
321		Épinard d'hiver
322		Épinard de printemps (mars)
323		Épinard de printemps (2F)
324		Épinard d'automne
325		Légumes 'légumineux'
330		Légumes 'fruits' : tomate/melon/cornichon
335		Plantes vivaces : asperge/rhubarbe
340		Plants et semences maraîchères
350		Pomme de terre
351		Pdt consommation
352		Pdt féculière
353		Pdt plants
360		Haricots
365		Pois
370		Fèves
375		Potiron
380		Autres légumes cultivés en champs
405		Sarrasin

410	Colza d'hiver
411	Colza alimentaire
412	Moutarde et colza non-alimentaire
420	Colza d'été
421	Colza d'été alimentaire
422	Colza d'été non alimentaire et moutarde
425	Tournesol
430	Betterave sucrière
440	Lin
441	Lin alimentaire
442	Lin non-alimentaire
450	Chicorée
451	Chicorée a café
452	chicorée a inuline
453	Chicon witloof
460	Fraisier
465	Plantes aromatiques et épices
470	Houblon
475	Tabac
485	Phacélie
490	Plants et semences agricoles
495	Couverts naturels
510	Hautes tiges
511	Hautes tiges - Pépins
512	Hautes tiges - Noyaux
520	Basses tiges
521	Basses tiges-Pommier
522	Basses tiges-Poirier
523	Prunier
524	Cerisier
525	Petits fruits 'type ligneux'
526	Vignes
530	Plants horticoles
610	Plantes ornementales
611	Petits arbustes (azalée/rhododendron)
612	Résineux
620	Bulbes et tubercules
630	Autres fleurs
640	Plantes médicinales
701	Feuillus
702	Résineux
703	Mixtes
704	Peupliers
810	Miscanthus
999	Indéterminé

✓ BIO : TYPE D'EXPLOITATION

sol_bio_code	type d'exploitation
100	Conventionnelle
200	Biologique
300	En_conversion
400	Conservation
999	Indéterminé/par défaut

✓ TABLE_METHODE : DESCRIPTION DES METHODES EMPLOYEES
DANS LE PROGRAMME CARBIOSOL

méthode_code	méthode
501	ISO 10694:1995(fr)
100	Infrarouge
503	cf. brochure
504	ISO 13878:1998
505	ISO 14240-2:1997
506	ISO 16072:2002(fr)
507	Frąc et al., 2012
508	ISO 14238:2012
509	ISO 23611-1:2018 adapté

✓ TABLE_INDICATEUR

indicateur_code	indicateur	méthode_code	sol2_code	profondeur d'échantillonnage minium (cm)	profondeur d'échantillonnage maximum (cm)
101	sol_carbone	501	110	0	20
101	sol_carbone	100	110	0	20
102	sol_carbone_inf20	501	110	0	20
102	sol_carbone_inf20	100	110	0	20
103	sol_carbone_sup20	501	110	0	20
103	sol_carbone_sup20	100	110	0	20
104	sol_c_eau_froide	503	110	0	10
105	sol_c_eau_chaude	503	110	0	10
106	sol_n_eau_froide	503	110	0	10
107	sol_n_eau_chaude	503	110	0	10
108	sol_c_mic	505	110	0	10
109	sol_n_mic	505	110	0	10
110	sol_p_respiration	506	110	0	10
111	sol_p_metabolique	507	110	0	10
112	sol_n_mineralisation	508	110	0	10
113	sol_lombric_dens	509	110	0	0
114	sol_lombric_mass	509	110	0	0
201	sol_carbone	501	120	0	10
201	sol_carbone	100	120	0	10
202	sol_carbone_inf20	501	120	0	10
202	sol_carbone_inf20	100	120	0	10
203	sol_carbone_sup20	501	120	0	10
203	sol_carbone_sup20	100	120	0	10
204	sol_c_eau_froide	503	120	0	10
205	sol_c_eau_chaude	503	120	0	10
206	sol_n_eau_froide	503	120	0	10
207	sol_n_eau_chaude	503	120	0	10
208	sol_c_mic	505	120	0	10
209	sol_n_mic	505	120	0	10
210	sol_p_respiration	506	120	0	10
211	sol_p_metabolique	507	120	0	10
212	sol_n_mineralisation	508	120	0	10
213	sol_lombric_dens	509	120	0	0
214	sol_lombric_mass	509	120	0	0
301	sol_carbone	501	130	0	10
301	sol_carbone	100	130	0	10
302	sol_carbone_inf20	501	130	0	10
302	sol_carbone_inf20	100	130	0	10
303	sol_carbone_sup20	501	130	0	10
302	sol_carbone_inf20	100	130	0	10
304	sol_c_eau_froide	503	130	0	10
305	sol_c_eau_chaude	503	130	0	10
306	sol_n_eau_froide	503	130	0	10
307	sol_n_eau_chaude	503	130	0	10
308	sol_c_mic	505	130	0	10
309	sol_n_mic	505	130	0	10
310	sol_p_respiration	506	130	0	10
311	sol_p_metabolique	507	130	0	10
312	sol_n_mineralisation	508	130	0	10
313	sol_lombric_dens	509	130	0	0
314	sol_lombric_mass	509	130	0	0

Dictionnaire des données sur la profondeur d'échantillonnage

Classe de profondeur	Indicateurs mesurés dans l'échantillon prélevé
sol_profondeur	sol_carbone ; sol_carbone_inf20 ; sol_carbone_sup20
sol_profondeur_IB	sol_c_eau_froide ; sol_c_eau_chaude ; sol_n_eau_froide ; sol_n_eau_chaude ; sol_c_mic ; sol_n_mic ; sol_p_respiration ; sol_p_metabolique ; sol_n_mineralisation
sol_profondeur_lombric	sol_lombric_dens ; sol_lombric_mass

CALCULS D'AUTRES INDICATEURS :

- Rapport carbone microbien / azote microbien ($=\text{sol_c_mic}/\text{sol_n_mic}$)
- Quotient métabolique ($=\text{sol_p_respiration}/\text{sol_c_mic}$)
- Quotient microbien ($=\text{sol_c_mic}/\text{sol_carbone}$)

ANNEXE 4 :

Canevas de présentation des données

« LIBRARIE SPECTRALE wallonne des teneurs en
fractions de carbone des sols »



Base de données « Librairie spectrale wallonne
des teneurs en fractions de carbone organique
des sols »

—

Canevas de présentation des données

Novembre 2018

Caroline Chartin, Fabio Castaldi et Bas van Wesemael (UCLouvain)

(caroline.chartin@uclouvain.be)

Sur base des documents officiels fournis par REQUASUD

Université Catholique de Louvain – Earth & Life Institute

Place Louis Pasteur, 3
1348 LOUVAIN-LA-NEUVE

1. Préambule

1.1. CONTEXTE DE LA CRÉATION DE LA LIBRAIRIE SPECTRALE

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 soumise 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. gestion agricole). Ce fut le **but du projet de recherche CARBIOSOL** (Juillet 2013-Janvier 2019, financement SPW-DGO3).

Le **Carbone Organique du Sol (COS)** est associé à différents processus physiques, chimiques et biologiques du sol. Il est l'indicateur 'classique' de suivi de la qualité des sols. En Wallonie, le COS est mesuré systématiquement lors des analyses de terres effectuées via les laboratoires de REQUASUD, notamment grâce à l'utilisation en routine de la SPIR (Spectroscopie Proche Infra-Rouge) [1]. Cependant, la dynamique du COS est lente et ses changements ne sont détectables qu'après plusieurs années ou décennies. La **séparation du COS en deux fractions** aide alors à démêler les tendances à long terme dans la stabilisation de la matière organique (fraction < 20µm) des processus liés à sa minéralisation et au taux de renouvellement des nutriments (fraction > 20µm, incluant le C labile). Pour plus de précisions, veuillez consulter la brochure CARBIOSOL [2].

Des échantillons de terres fines ($\emptyset < 2\text{mm}$) ont été prélevés et analysés pour la mesure des fractions de carbone organique des sols durant le projet CARBIOSOL (UCLouvain ; C. Chartin). Ces mêmes échantillons ont été également analysés par SPIR (Laboratoire de Tinlot ; V. Genot). Les **mesures des fractions de carbone organique et les spectres associés** ont été **compilés sous la forme d'une librairie spectrale** (« Librairie spectrale wallonne des teneurs en fractions de carbone organique des sols ») qui vous est présentée ici. Ce canevas présente également la méthodologie appliquée pour la **calibration de modèles d'estimation des fractions sur base de cette librairie**. Librairie spectrale et méthode de calibration définissent ainsi une **base pour la mise en routine de la mesure des fractions** de carbone organique dans les laboratoires provinciaux.

1.2. INFORMATIONS SUR LA LIBRAIRIE SPECTRALE

- La « Librairie spectrale wallonne des teneurs en fractions de carbone organique des sols » est compilée sous forme d'un fichier excel contenant deux feuille :
 - La feuille 1 (« Mesures fractions ») regroupe les informations signalétiques des échantillons, les références des spectres associés et les données analytiques des fractions de carbone ;
 - Et la feuille 2 (« Spectres ») contient les données des spectres associés aux échantillons (2 spectres par échantillon, chacun des deux ayant la même référence reportée dans les feuilles 1 et 2 afin de pouvoir lier l'ensemble des informations).

- Les colonnes « NUM_ECHANTILLON » et « ID_ECHANTILLON » reportent les mêmes informations que celles de la BDD CARBIOSOL. Ainsi, l'utilisateur peut obtenir plus d'informations sur les échantillons en consultant cette BDD.
- Sous sa forme finale, la librairie comporte les mesures de fractions et les spectres (2 par échantillons) relatives à 325 échantillons.
- Une version verrouillée de ce fichier est disponible sur demande auprès de REQUASUD.

2. Structure du fichier

2.1. FEUILLE 1 : « MESURES FRACTIONS »

Colonne Excel	Intitulé	Description et remarques	Type de données	Nombre de décimales	Unités	Champs obligatoires
A	ID_ECHANTILLON	Identifiant propre de l'échantillon dans la BDD CARBIOSOL. Mention ND lorsque celui-ci n'est pas présent dans la BDD CARBIOSOL	Chaîne de caractères			OUI
B	NOM_ECHANTILLON	Nom de l'échantillon lors des conventions	Chaîne de caractères			OUI
C	ID_SPECTRE	Identifiant des deux spectres associés à chaque échantillon	Chaîne de caractères			OUI
D	OCCUPATION	Occupation du sol au moment du prélèvement	Chaîne de caractères			OUI
E	C_ORGANIQUE	Carbone organique total (COT)	Numérique	1	%C m.s.	OUI
F	C_ORGANIQUE_INF20	Carbone de la fraction inférieure à 20µm (C<20µm)	Numérique	1	%C m.s.	OUI
G	C_ORGANIQUE_SUP20	Carbone de la fraction supérieure à 20µm (C>20µm)	Numérique	1	%C m.s.	OUI

2.1. FEUILLE 2 : « SPECTRES »

Colonne Excel	Intitulé	Description et remarques	Type de données	Nombre de décimales	Unités	Champs obligatoires
A	ID_SPECTRE	Identifiant des deux spectres associés à chaque échantillon	Chaîne de caractères			OUI
B	DATE_SPECTRE	Mois et année de l'analyse SPIR	Date : MM-AA			
C à ANL	400 à 2498	Absorbance (log 1/R) mesurée à la longueur d'onde dont la valeur est l'intitulé de colonne	Numérique	7	-	OUI

3. Méthode de calibration des modèles d'estimation des fractions

Différentes méthodes de calibration de modèles ont été testées sur base de la « librairie spectrale » afin d'estimer les fractions de carbone organique. La méthode montrant le plus de potentialité en terme de pouvoir de prédiction et de précision est la suivante :

1. L'ensemble des échantillons est utilisé, i.e. Culture et Prairie confondus ;
2. La variable dépendante est $\ln(C_ORGANIQUE_SUP20 / C_ORGANIQUE_INF20)$;
3. Les variables indépendantes sont les valeurs d'absorbance mesurées en SPIR ;
4. Un modèle PLSR (Partial Least Square Regression) est ajusté ;
5. Les valeurs prédites sont transformées en pourcentage de C_ORGANIQUE_SUP20 et C_ORGANIQUE_INF20 contenu dans le C_ORGANIQUE (i.e. la somme des deux fractions est égale à la teneur en COT) ;
6. Les pourcentages sont convertis en %C grâce à la valeur de C_ORGANIQUE.

Pour terminer, appliquer une validation externe 10-folds cross-validation (par exp. 100 itérations).

Références

- [1] Minet, O., Ferber, F., Jacob, L., *et al.*, 2016. La spectrométrie proche infrarouge – une technologie rapide, précise et écologique pour déterminer la composition et la qualité des produits agricoles et alimentaires. ASBL REQUASUD, Gembloux, 32pp.
- [2] Vincent, Q., Chartin, C., Krüger, I., van Wesemael, B., Carnol, M., 2019. La qualité biologique et le carbone organique des sols agricoles wallons. Service Public de Wallonie.

ANNEXE 5 :

Scripts informatiques du logiciel R pour les sorties
statistiques et graphiques de la base de données
« CARBIOSOL »



Scripts informatiques du logiciel R
pour les sorties statistiques et graphiques
de la base de données « CARBIOSOL »

Janvier 2019

Quentin Vincent (ULiège)

(quentin.vincent@uliege.be)

Université de Liège – Laboratoire d'écologie végétale et microbienne

Chemin de la vallée, 4

4000 LIEGE

Tél. : (32) 4 3663845

1. PREAMBULE

1.1. CONTEXTE DE LA CREATION DE LA BASE DE DONNEES ET DES SCRIPTS R

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 soumise à de nombreuses pressions, il s’avère 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. gestion agricole). Ce fut le **but du projet de recherche CARBIOSOL** (Juillet 2013-Janvier 2019, financement SPW-DGO3).

Le Carbone Organique du Sol (COS) est associé à différents processus physiques, chimiques et biologiques du sol. Il est l’indicateur ‘classique’ de suivi de qualité des sols. En Wallonie, le COS est mesuré systématiquement lors des analyses de sols effectuées via les laboratoires de REQUASUD, et un réseau de surveillance est consacré au suivi de ses stocks dans les sols agricoles, i.e. le réseau CARBIOSOL (Réseau CARBIOSOL ; Goidts, 2009). Cependant, la dynamique du COS est lente et ses changements ne sont détectables qu’après plusieurs années ou décennies. De nouveaux indicateurs, plus réactifs et complémentaires, ont donc été sélectionnés dans le cadre du projet CARBIOSOL :

- La **séparation du COS en deux fractions** aide à démêler les tendances à long terme dans la stabilisation de la matière organique (fraction < 20µm) des processus liés à sa minéralisation et au taux de renouvellement des nutriments (fraction > 20µm, incluant le C labile).
- Des **indicateurs biologiques** (respiration potentielle, biomasse microbienne, minéralisation nette de l’azote, potentiel métabolique des bactéries, vers de terre, quotients microbien et métabolique) fournissent des informations complémentaires par rapport à l’activité des micro-organismes et à la diversité métabolique des organismes impliqués dans la minéralisation de la matière organique.

Les indicateurs ci-dessus peuvent non seulement **améliorer le suivi de la qualité du sol** à l’échelle régionale, mais également fournir des **informations supplémentaires aux agriculteurs** pour leur gestion au niveau parcellaire. Des exemples concrets d’utilisation de ces différents indicateurs, ainsi que les méthodes analytiques associées, sont proposés dans la brochure intitulée « La qualité biologique des sols agricoles en Wallonie ».

Une **analyse et synthèse de l’ensemble des résultats du projet CARBIOSOL** a été réalisée. Une **première base de données (BDD)** - « CARBIOSOL – indicateurs biologiques et carbone organique des sols agricoles wallons » - comprend l’ensemble des valeurs des indicateurs biologiques et des données liées au COS collectées au cours du projet. Cette BDD est hébergée sur un serveur de l’université de Liège et n’est **pas évolutive**, i.e. aucune donnée ne peut y être ajoutée.

1.2. TELECHARGEMENT DE LA BASE DE DONNEES

La base de données est accessible (avec un mot de passe) sous format « .CSV » (lisible par excel et par le logiciel R) sur le site www.carbiosol.uliege.be, dans l’onglet « Base de données CARBIOSOL ». Le canevas de la base de données est accessible au même endroit. Les accès sont à demander aux bénéficiaires de la convention.

1.3. INSTALLATION DU LOGICIEL STATISTIQUE 'R STUDIO'

1/ Installation de R

Commencez par télécharger le logiciel R (fichier R-x-win.exe où x est le numéro de la dernière version disponible) à l'adresse suivante : <http://cran.r-project.org/bin/windows/base/>

Enregistrez ensuite ce fichier exécutable sur le bureau de Windows puis double cliquez sur le fichier R-x-win.exe. Le logiciel s'installe alors et vous n'avez plus qu'à suivre les instructions qui s'affichent et à conserver les options proposées par défaut. Lorsque l'icône est ajoutée sur le bureau, l'installation peut être considérée comme terminée.

2/ Installation de R-studio

Une fois R correctement installé, rendez-vous sur le site suivant : <http://www.rstudio.com/products/rstudio/download/> pour télécharger la dernière version stable de R-Studio. Plus précisément, il s'agit de l'édition Open Source de RStudio Desktop. Choisissez l'installateur correspondant à votre système d'exploitation et suivez les instructions du programme d'installation. Lancer ensuite R-studio qui est installé sur le bureau.

1.4. PRESENTATION DE L'INTERFACE 'R STUDIO'

Ici, nous utiliserons une interface nommée Rstudio (RStudio Team, 2015) créée spécifiquement pour travailler avec le logiciel R mais de façon plus conviviale et intuitive, en permettant de consulter aisément ses fichiers de script, la ligne de commande R, les rubriques d'aide, les graphiques, etc. (Fig. 1).

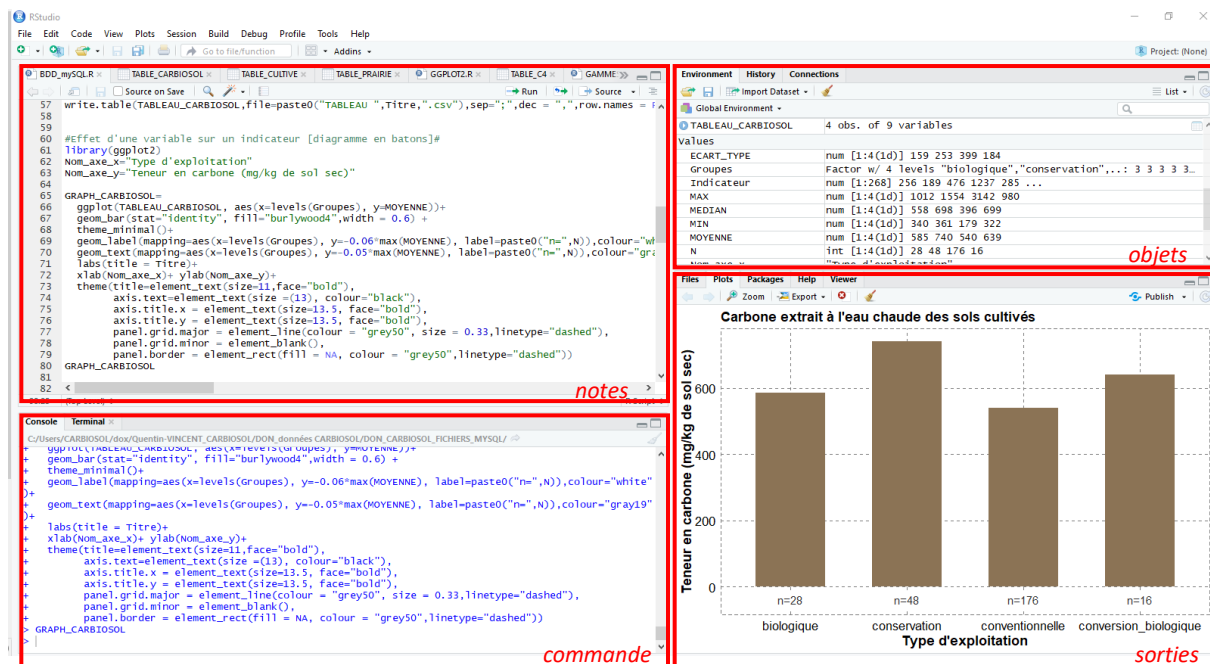


Figure 1. Interface R Studio (RStudio Team, 2015) compose de 4 consoles, encadrées en rouge ici. En haut à gauche, la console 'notes' où l'on peut consulter les différents scripts, tableaux... En bas à gauche, se situe la console 'commande' où les lignes de

scripts sont exécutées (en bleu), et où les résultats (en noir) et messages d'avertissement ou erreur (en rouge) sont affichés. En haut à droite se trouve la console '**objets**' on peut consulter l'environnement qui regroupe les différents objets existant ainsi que l'historique des lignes de codes lancées précédemment ; En bas à droite, on trouve la console '**sorties**' où l'on peut accéder aux dossiers et fichiers de l'ordinateur (files), afficher des graphiques et cartes (plots) [comme illustré ici], lancer/télécharger des packages et appeler l'aide en ligne (help).

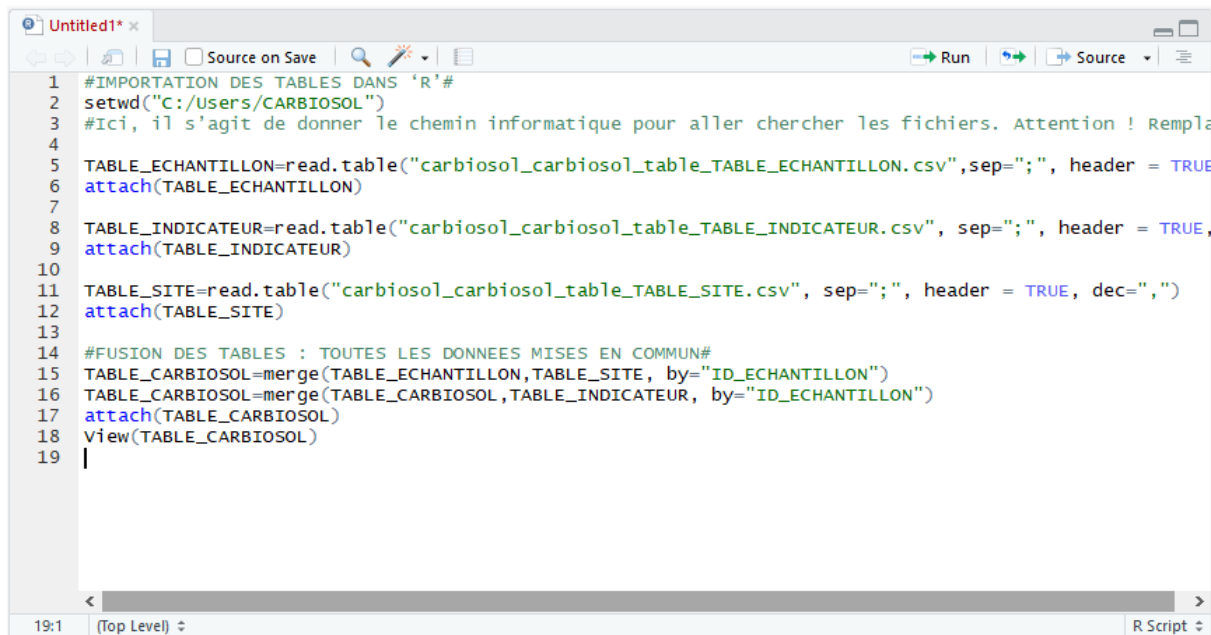
Exécuter des lignes de commandes

1/ Méthode 1 :

Les lignes de commandes présentées dans le document sont à « coller » dans la console commande (en bas à gauche) de l'interface R studio. Quand les lignes sont collées, taper sur « entré » du clavier et les commande s'exécuteront.

2/ Méthode 2 :

Il est également possible de passer par la console 'notes' afin de structurer plus aisément les commandes. Pour cela cliquer sur l'icône  tout en haut à gauche (en dessous de l'onglet 'file') pour générer un nouveau script. Un menu déroulant s'affiche ; sélectionner le 1er icône  R Script Ctrl+Shift+N . A ce moment-là, une page se génère. Vous pouvez copier toutes les lignes de commande dans sur page. Par exemple, on peut coller les 1^{ères} lignes de commandes présentées dans ce document.



```

1 #IMPORTATION DES TABLES DANS 'R'#
2 setwd("C:/Users/CARBIOSOL")
3 #Ici, il s'agit de donner le chemin informatique pour aller chercher les fichiers. Attention ! Remplir
4
5 TABLE_ECHANTILLON=read.table("carbiosol_carbiosol_table_TABLE_ECHANTILLON.csv",sep=";", header = TRUE)
6 attach(TABLE_ECHANTILLON)
7
8 TABLE_INDICATEUR=read.table("carbiosol_carbiosol_table_TABLE_INDICATEUR.csv", sep=";", header = TRUE,
9 attach(TABLE_INDICATEUR)
10
11 TABLE_SITE=read.table("carbiosol_carbiosol_table_TABLE_SITE.csv", sep=";", header = TRUE, dec=",")
12 attach(TABLE_SITE)
13
14 #FUSION DES TABLES : TOUTES LES DONNEES MISES EN COMMUN#
15 TABLE_CARBIOSOL=merge(TABLE_ECHANTILLON, TABLE_SITE, by="ID_ECHANTILLON")
16 TABLE_CARBIOSOL=merge(TABLE_CARBIOSOL, TABLE_INDICATEUR, by="ID_ECHANTILLON")
17 attach(TABLE_CARBIOSOL)
18 View(TABLE_CARBIOSOL)
19 |
  
```

Pour exécuter ensuite ces commandes, sélectionner avec la souris l'ensemble des commandes à exécuter, puis cliquer sur « Run »  ou, appuyer en même temps sur « Ctrl » et « Enter ». Si vous souhaitez enregistrer ce script, il suffit de cliquer sur l'icône sauvegarde  . Conservez le format « ISO-8859-1 » par défaut puis enregistrer le fichier là où vous le souhaitez.

Pour tous ce qui concerne les sorties (statistiques et graphiques), des lignes de commandes spécifiquement conçues sont décrites dans ce document, permettant de générer automatiquement des fichiers (excel et image) sans passer par l'interface 'R studio'.

2. SCRIPTS ET EXEMPLES DE SORTIES

REGLES :

Ce qui est surligné en jaune doit être remplacé par les informations demandées. Le reste du script (en noir) ne doit pas être modifié. Ce qui est entre croisillons (#) est de l'information concernant les lignes de commandes.

2.1. INSTALLATION DES LIBRAIRIES DANS 'R'

```
install.packages("ggplot2", dependencies = FALSE)
```

2.2. IMPORTATION DES FICHIERS DANS LE LOGICIEL 'R' ET CONSTITUTION DES TABLES

#IMPORTATION DE LA BDD DANS 'R'#

```
setwd("C:/Users/CARBIOSOL")
```

#Ici, il s'agit de donner le chemin informatique pour aller chercher les fichiers. Attention ! Remplacer le chemin informatique par celui du « Dossier de la BDD », contenant la base de données « BDD_CARBIOSOL ». #

```
BDD_CARBIOSOL=read.table("CARBIOSOL_BDD.csv",sep=";", header = TRUE, dec=",")
attach(BDD_CARBIOSOL)
View(BDD_CARBIOSOL)
```

#POUR SELECTIONNER UNIQUEMENT LES SOLS CULTIVEES OU DE PRAIRIES#

```
BDD_CULTIVE= BDD_CARBIOSOL [which(BDD_CARBIOSOL $OCCUPATION == "culture"),]
attach(BDD_CULTIVE)
View(BDD_CULTIVE)
BDD_PRAIRIE= BDD_CARBIOSOL [which(BDD_CARBIOSOL $OCCUPATION == "prairie"),]
attach(BDD_PRAIRIE)
View(BDD_PRAIRIE)
```

2.3. GENERER AUTOMATIQUEMENT DES TABLEAUX ET GRAPHIQUES

```
library(ggplot2)
```

```
Donnees=BDD_CARBIOSOL
```

```
attach(Donnees)
```

#Si les graphiques concernent :

- Toutes les données, c'est à dire les sols cultivés ET les prairies, le terme surligné en bleu doit être « BDD_CARBIOSOL »

- Uniquement les données des sols cultivés, le terme surligné en bleu doit être « BDD_CULTIVE »

- Uniquement les données des sols de prairies, le terme surligné en bleu doit être « BDD_PRAIRIE ».

#les termes surlignés en jaune doivent être modifiés selon l'indicateur (ici, C_MIC est mis en exemple) et la variable explicative souhaités (ici, REGION_AGRICOLE est mis en exemple)#

```
Indicateur=C_MIC
```

```
Groupes=REGION_AGRICOLE
```

```
Titre ="Teneur en carbone microbien des sols cultivés selon les régions agricoles"
```

#pour supprimer les valeurs manquantes "NA" #

```
Dataset=data.frame(Groupes,Indicateur)
```

```
Data_noNA=na.omit(Dataset)
```

```
Indicateur=Data_noNA$Indicateur
```

```
Groupes=Data_noNA$Groupes
```

#2.3.1. TABLEAU : EFFET D'UNE VARIABLE SUR UN INDICATEUR

```
N=tapply(Indicateur,Groupes,length)
```

```
MIN=tapply(Indicateur,Groupes, quantile, probs=0)
```

```
Q1=tapply(Indicateur,Groupes, quantile, probs=0.25)
```

```
MEDIAN=tapply(Indicateur,Groupes, quantile, probs=0.5)
```

```
MOYENNE=tapply(Indicateur,Groupes,mean)
```

```
Q3=tapply(Indicateur,Groupes, quantile, probs=0.75)
```

```
MAX=tapply(Indicateur,Groupes, quantile, probs=1)
```

```
ECART_TYPE=tapply(Indicateur,Groupes,sd)
```

```
TABLEAU_CARBIOSOL=data.frame(levels(Groupes),N,MIN,Q1,MEDIAN,MOYENNE,Q3,MAX,ECART_TYPE)
```

```
TABLEAU_CARBIOSOL
```

```
write.table(TABLEAU_CARBIOSOL,file=paste0("TABLEAU ",Titre,".csv"),sep=";",dec = ",",row.names = FALSE)
```

#Un fichier excel est enregistré dans le « Dossier de la BDD » dont le nom est automatiquement celui donné en « Titre ». Si vous ne retrouvez plus le « Dossier de la BDD », tapez la commande « getwd() ». N=nombre d'échantillons, min=minimum, Q1=1^{er} quartile (25%), Q3=3^{ème} quartile (75%), max=maximum. #

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	levels.Groupe.	N	MIN	Q1	MEDIAN	MOYENNE	Q3	MAX	ECART_TYPE	
2	ardennes	30	355,6642055	740,2791307	965,1846294	1084,81659	1351,09	2185,303771	512,8219774	
3	condroz	38	164,6409594	313,2360218	458,55	649,7642265	863,2836773	2046,901647	516,7300549	
4	famenne	6	1118,269827	1229,812326	1542,814609	1712,70347	1803,284649	3056,735547	716,2715869	
5	limoneuse	183	54	241,25	321,9	373,9532559	450,25	1876,23044	229,1070054	
6	sablo-limoneuse	70	165,7910089	284,5645473	481,4	461,6011023	594,55	882,4	181,5938432	

#2.3.2. DIAGRAMME EN BATONS : EFFET D'UNE VARIABLE SUR UN INDICATEUR#

library(ggplot2)

Nom_axe_x="Régions agricoles"

Nom_axe_y="Teneur en carbone microbien du sol (mg/kg de sol sec)"

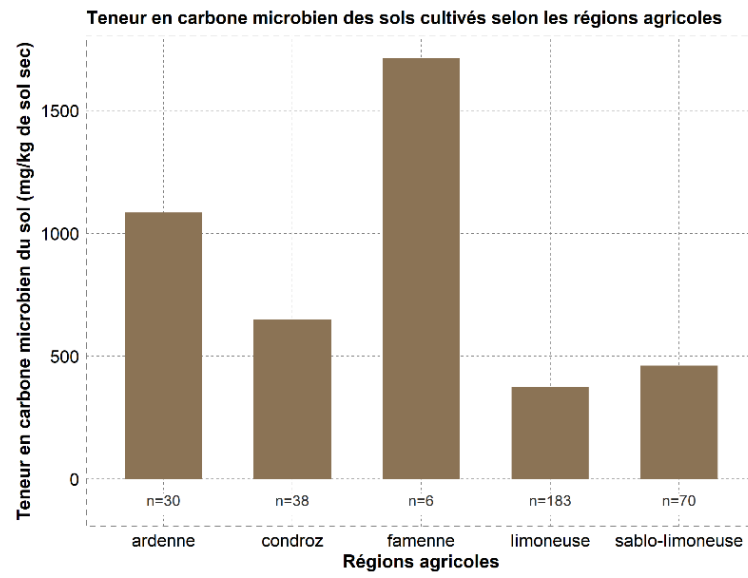
GRAPH_CARBIOSOL=

```
ggplot(TABLEAU_CARBIOSOL, aes(x=levels(Groupe), y=MOYENNE))+
  geom_bar(stat="identity", fill="burlywood4",width = 0.6) +
  theme_minimal()+
  geom_label(mapping=aes(x=levels(Groupe), y=-0.06*max(MOYENNE),
label=paste0("n=",N)),colour="white")+
  geom_text(mapping=aes(x=levels(Groupe), y=-0.05*max(MOYENNE),
label=paste0("n=",N)),colour="gray19")+
  labs(title = Titre)+
  xlab(Nom_axe_x)+ ylab(Nom_axe_y)+
  theme(title=element_text(size=11,face="bold"),
        axis.text=element_text(size=(13), colour="black"),
        axis.title.x = element_text(size=13.5, face="bold"),
        axis.title.y = element_text(size=13.5, face="bold"),
        panel.grid.major = element_line(colour = "grey50", size = 0.33,linetype="dashed"),
        panel.grid.minor = element_blank(),
        panel.border = element_rect(fill = NA, colour = "grey50",linetype="dashed"))
```

GRAPH_CARBIOSOL

ggsave(paste0("GRAPHIQUE ",Titre,".tiff"))

Un fichier image est enregistré dans le « Dossier de la BDD » dont le nom est automatiquement celui donné en « Titre ». Si vous ne retrouvez plus le « Dossier de la BDD », tapez la commande « getwd() ».



ANNEXE 6 :

Scripts informatiques du logiciel R pour les sorties et mises à jours cartographiques



Mise à jour des outils cartographiques du carbone
organique des sols & transfert vers le géoportail

—
Procédure et Scripts informatiques (R)

Décembre 2018

Caroline Chartin (UCLouvain)

Julien Tuyls et Florence Ferber (REQUASUD)

(caroline.chartin@uclouvain.be)

Université Catholique de Louvain – Earth & Life Institute

Place Louis Pasteur, 3
1348 LOUVAIN-LA-NEUVE

Table des matières

1. PRÉAMBULE.....	161
1.1. CONTEXTE	161
1.2. PRINCIPES DE LA CARTOGRAPHIE NUMÉRIQUE DES SOLS	162
2. ENTRÉES DU MODÈLE.....	163
2.1. Les données de Carbone Organique TOTAL	163
2.2. Les CO-VARIABLES ENVIRONNEMENTALES	163
3. MODÈLE ADDITIF GÉNÉRALISÉ.....	165
4. SORTIES DU MODÈLE	166
4.1. Les outils cartographiques.....	166
4.2. Les métadonnées : pour un encodage dans METAWAL.....	166
5. transfert des CARTES et métadonnées DE REQUASUD AU service SIG du SPW	167
6. R et les scripts informatiques	168
6.1. installation des éléments software nécessaire pour le run des scripts.....	168
6.2. quelques généralités sur R et l’interface R-studio.....	170
6.3. StructurEs et presentation des scripts.....	173
6.3.1. structure relationnelle entre les scripts	174
6.3.2. SCRIPT PRINCIPAL : ‘COT_map_MAIN_SCRIPT.R’.....	175
6.3.3. SCRIPTS ANNEXES.....	179
Références.....	191

1. PRÉAMBULE

1.1. CONTEXTE

Le **carbone organique total du sol (COT)** est associé à différents processus physiques, chimiques et biologiques du sol. Il est **l'indicateur 'classique' de suivi de la qualité des sols**. Il permet également d'apprécier les niveaux de Matières Organiques dans les Sols, le COT composant environ 57% de celles-ci.

En Wallonie, le COT est **mesuré systématiquement lors des analyses de sols effectuées via les laboratoires de REQUASUD**, et un réseau de surveillance est consacré au suivi des stocks de COT dans les sols agricoles, i.e. le réseau CARBOSOL (Goidts, 2009 ; Chartin *et al.*, 2017).

Face à des phénomènes accrus de dégradation des sols (érosion, pollution, agriculture intensive...), l'évaluation et le suivi de la qualité des sols sont devenus une priorité pour plusieurs pays européens, mais également pour la Wallonie. De ce fait, le **projet de recherche CARBIOSOL** (Juillet 2013-Janvier 2019, financement SPW-DGO3) s'est consacré à **développer de nouveaux indicateurs** de la qualité des sols, **des bases de données** de référence, et des **outils graphiques et cartographiques** accessibles au plus grand nombre.

La **cartographie du COT** à l'échelle de la région wallonne est un **outil majeur** d'aide à la décision pour les politiques et les gestionnaires, mais également un outil crucial pour différents travaux de recherche et de développement. C'est ainsi que les cartes consacrées aux COT, se basant sur les données de REQUASUD, sont publiées depuis plusieurs années dans l'Etat de l'Environnement Wallon (DGO3, 2017) et sont consultables, et disponibles à la demande, dans WalOnMap - le géoportail de la Wallonie (<http://geoportail.wallonie.be>).

Une méthodologie scientifique rigoureuse d'analyse spatiale du COT se basant sur les principes de Cartographie Numérique des Sols (§1.2) a été développée via le projet CARBIOSOL afin d'améliorer la spatialisation du COT. Les résultats obtenus via cette nouvelle méthode de cartographie se sont révélés de meilleure qualité que les précédentes méthodes cartographiques testées en Wallonie (en termes de précisions et de détails de spatialisation). Cette méthode permet également de plus clairement identifier les principaux facteurs environnementaux responsables de la variabilité spatiale du COT. Cette méthodologie a été **encodée sous forme de scripts informatiques R** (<https://www.R-project.org>), **et adaptée à la BDD centralisatrice de REQUASUD**, afin d'être aisément renouvelée. La dynamique du COT étant lente et ses changements détectables qu'après plusieurs années ou décennies, une mise à jour tous les 5 ans apparaît raisonnable. Le **formatage des cartes** obtenues a été conçu pour faciliter la **publication dans WalOnMap** (série CARBIOSOL), et la **comparaison et/ou calcul sur rasters** par les utilisateurs de ces produits cartographiques.

Ce document présente la procédure de mise à jour des cartes de COT à travers la description des données nécessaires à la modélisation – les ENTRÉES (§2), de la méthodologie appliquée – le MODÈLE (§3), et des produits cartographiques obtenus – les SORTIES (§4). Un protocole de transfert des données produites vers la cellule SIG du SPW est proposé (§5). Pour finir, les scripts informatiques permettant d'exécuter la procédure sont décrits, ainsi que leur fonctionnement (§6). Avant de commencer, vous sont proposées les principes de la Cartographie Numérique des Sols (§1.2) pour une meilleure compréhension de la démarche.

1.2. PRINCIPES DE LA CARTOGRAPHIE NUMÉRIQUE DES SOLS

La méthode de cartographie appliquée ici utilise des techniques de cartographie numérique des sols (CNS, ou Digital Soil Mapping en anglais - DSM).

Les informations suivantes sont extraites de Lagacherie *et al.* (2013) et légèrement modifiées:

Le principe général de la CNS est résumé en Figure 1. Il s'agit de prédire des classes de sol ou des propriétés de sol en utilisant d'une part les données pédologiques disponibles sur la zone à étudier et, d'autre part, les données spatiales représentant des éléments du paysage en relation (de causalité ou non) avec les sols, appelées ici « co-variables » du sol.

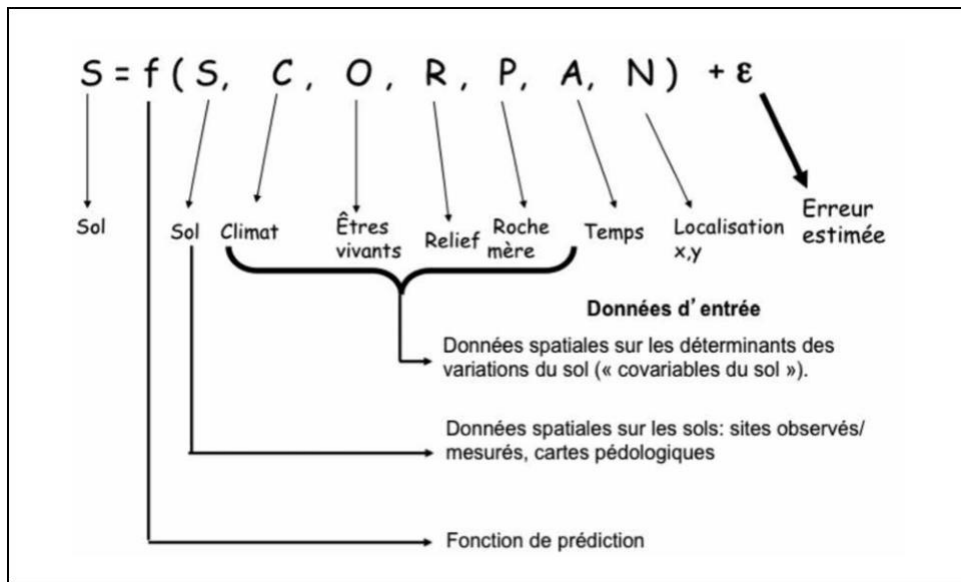


Figure 1. Principe général de la Cartographie Numérique des Sols (CNS) ou Digital Soil Mapping (DSM).

Figure adaptée de McBratney *et al.*, 2003 (Source : Lagacherie *et al.*, 2013).

Le concept de la CNS reprend en partie celui dit « CLORPT » de Jenny (1941) :

Soil = f (CLimate, ORganisms, RELief, PARENT material, Time)

La CNS ajoute au concept de Jenny une dimension spatiale supplémentaire, la notion d'incertitude ou de variabilité « non prédictible », ainsi que le recours possible à des données spatiales numériques (Modèles Numériques d'Altitude, images de télédétection, données de capteurs de propriétés de sol) qui sont devenues disponibles pour les pédologues cartographes. Ces prédictions sont réalisées par des fonctions de prédiction induites, soit par des modèles statistiques ou géostatistiques prenant en compte les données disponibles, soit par des formalisations numériques de l'expertise de pédologues. Un grand intérêt est que ces fonctions, totalement explicites, peuvent être calibrées et validées, délivrant ainsi une estimation de l'incertitude de prédiction. Un autre intérêt est qu'à la différence de l'expertise du pédologue, ces modèles sont totalement reproductibles et transférables, et qu'ils peuvent être améliorés constamment par l'ajout de nouvelles données ou par des avancées méthodologiques.

2. ENTRÉES DU MODÈLE

2.1. Les données de Carbone Organique TOTAL

La variable dépendante du modèle est ici la teneur en Carbone Organique des Total des sols (COT), exprimée en % C, i.e. en pourcent de carbone, équivalent à g de carbone / 100g de terre fine (particules de $\varnothing < 2\text{mm}$).

Les données sont issues de la base de données centralisée de REQUASUD et correspondent aux observations faites sous cultures et sous prairies et qui ont été correctement géoréférencées. Le géoréférencement des parcelles analysées à la demande des agriculteurs par le réseau REQUASUD s'applique depuis 2003, et est devenu systématique ses dernières années. **Sans géoréférencement, la technique de CNS choisie ici ne peut s'appliquer.**

Les scripts informatiques délivrés pour être appliqués aux données de REQUASUD n'ont pas pour fonction d'extraire les données directement de la base de données REQUASUD. Cette étape est effectuée en amont par le technicien informatique de REQUASUD en charge. Les données sont extraites dans un fichier au format .csv contenant les informations présentées dans le Tableau 1.

!! Message important !! utiliser si possible pour ce fichier, la virgule comme séparateur de colonnes et le point comme symbole pour les décimales.

*Tableau 1 : Liste et description des données extraites de la BDD centralisée de REQUASUD nécessaires à la procédure de cartographie du COT; données extraites sous format .csv. **Appliquer impérativement les intitulés de colonnes ci-dessus pour que les scripts informatiques puissent reconnaître correctement les variables.***

Colonne Excel	Intitulé	Description et remarques	Type de données	Nombre de décimales	Unités	Champs obligatoires
A	OccupSol	Occupation du sol au moment du prélèvement	Chaine de caractères			OUI
B	annee	Année du prélèvement	Numérique	0	(-)	OUI
C	X	Coordonnée Longitudinale du lieu de prélèvement en LAMBERT 72	Numérique	0	m	OUI
D	Y	Coordonnée Latitudinale du lieu de prélèvement en LAMBERT 72	Numérique	0	m	OUI
E	COT	Carbone organique total (COT)	Numérique	1	%C m.s.	OUI

2.2. Les CO-VARIABLES ENVIRONNEMENTALES

De nombreux paramètres ont été sélectionnés selon leur influence potentielle sur la teneur en COT, mais aussi selon leur disponibilité sous forme de cartes numériques ou potentialité à être spatialisés (Tab. 2). Ainsi, des couches de données spatialisées, sous format raster, ont été **compilées sous la même résolution et typologie**. Afin de conserver une résolution suffisamment proche de la surface investiguée sur le terrain (la parcelle), tout en évitant des temps de calculs trop longs, une résolution de 90 m a été choisie. L'ensemble des couches rasters d'entrées et de sorties de la procédure répondent aux caractéristiques décrites dans le Tableau 3.

Tableau 2 : Liste et description des co-variables environnementales utilisées dans la procédure de cartographie du COT.

Co-variable	Identifiant (scripts)	Définition	Continue (C) ou discrète (D)	Unité	Source
Relief					
altitude	alti	Altitude	C	m	Dérivés à partir du MNT SRTM 90m de la NASA (résolution 90m à l'Equateur)
pente	pente	Gradient de pente	C	degrés	
TPI	tpi	Index de position topographique (Jeness, 2006)	C	(-)	
longueur de flux	lg_flux	Longueur de flux selon la RUSLE	C	m	
eastness	east	Orientation de la pente par rapport à l'est (Zar, 1999)	C	(-)	
nothness	north	Orientation de la pente par rapport au nord (Zar, 1999)	C	(-)	
Climat					
précipitations	precip	Précipitations totales anuelles moyennes	C	mm	Sur base de données pour la période 2000-2006 des stations météorologiques de Belgique et pays alentours, cartes produites par co-krigeage utilisant les données du MNT SRTM de la NASA (Chartin et al., 2017)
températures	temp	Températures annuelles moyennes	C	°C	
Sol					
argiles	arg	Teneur en argiles (< 2µm)	C	rapport à 1	Sur base des données de AardeWerk; cartes produites par Dimitri d'Or (Ephesia)
limons	lim	Teneur en limons (2-50µm)	C	rapport à 1	
sables	sab	Teneur en sables (50-2000µm)	C	rapport à 1	
argiles et limons fins	alf	Teneur en argiles et limons fins (< 20µm)	C	rapport à 1	
niveau minimum de la nappe	nap_min	Niveau hivernal de la nappe phréatique	D	m	Sur base des données de AardeWerk (Meersmans et al., 2008)
niveau maximum de la nappe	nap_max	Niveau estival de la nappe phréatique	D	m	
Utilisation du sol					
occupation du sol	occ_sol	Occupation principale du sol (cultures, prairies, forêts ou autres)	D	(-)	Simplification de la COSW (http://geoportail.wallonie.be/)
régions agricoles	regions_agricoles	Régions agricoles officielles wallonnes	D	(-)	Rasterisation du shapefile officiel (http://geoportail.wallonie.be/)
facteur C	c_fact	Facteur de culture/végétation selon la RUSLE	D	(-)	Sur base des données établies lors du projet ERRUISSOL (GISER, SPW-DGO3; Maignard et al., 2012)
fumures et lisiers	c_input	Apports annuelles moyens de fumures et lisiers par commune	D	MgC ha-1 an-1	Sur base des données de l'INS pour la période 2007-2012; application de la méthode développée par Dendoncker et al. (2004)

Tableau 3 : caractéristiques des couches rasters (entrées et sorties du modèle) impliquées dans la procédure de cartographie du COT.

Caractéristiques*	Définition	Valeurs	Unité
Matrice de cellules			
colonnes	nombre de colonnes de pixels	2891	(-)
rangs	nombre de rangs de pixels	1675	(-)
Taille de cellule (X, Y)		90, 90	m
Etendue spatiale			
Y max	latitude maximale	169790.8342130	m; projection LAMBERT 72
X min	longitude minimale	39005.9105857	
X max	longitude maximale	299195.9105860	
Y min	latitude minimale	19040.8342133	

* grille établie à partir du SRTM 90m de la NASA (en degrés décimaux) et projetée en LAMBERT 72 (ArcGis10)

3. MODÈLE ADDITIF GÉNÉRALISÉ

Pour chaque occupation de sol principale (i.e. cultures et prairies), un Modèle Additif Généralisé (MAG; Trever et Tibshirani, 1986) est ajusté sur un jeu de calibration contenant deux tiers des points d'observation concernés, et validé sur le tiers restant. Les points du jeu de calibration sont choisis par échantillonnage en hypercube latin (Minasny et McBratney, 2006), conditionné par les coordonnées géographiques X et Y, et les valeurs de COT. Il s'agit d'une méthode de sélection aléatoire stratifiée : la stratification s'opère en fonction des coordonnées géographiques et des valeurs en COT, puis des sélections aléatoires sont faites dans chaque strate. De cette manière, les échantillons choisis couvrent au mieux la gamme de COT observée mais également l'ensemble du territoire étudié.

Un MAG 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 et les co-variables (Eq. 1):

$$E(Y | X_1, X_2, \dots, X_p) = \alpha + f_1 X_1 + f_2 X_2 + \dots + f_p X_p \quad (1)$$

Avec Y la variable dépendante, X1, X2..., Xp les co-variables et f1, f2,..., fn les fonctions de lissage (semi ou non-paramétriques). Comme pour les modèles linéaires généralisés, la moyenne conditionnelle $\mu(X)$ de la variable dépendante Y est dans un GAM liée à la fonction additive des co-variables via une fonction de liaison g (Hastie *et al.*, 2009) (Eq. 2):

$$g[\mu(Y)] = \alpha + f_1 X_1 + f_2 X_2 + \dots + f_p X_p \quad (2)$$

La répartition des données de COS étant le plus souvent logarithmique, la fonction de liaison utilisée est alors $g(\mu) = \log(\mu)$. Pour éviter un 'over-fit' des modèles, des régressions de Spline en Plaque Mince (SPM) ont été ajustées par vraisemblance maximum pénalisée aux différentes co-variables.

Une approche bayésienne, telle que proposée dans le package mgcv pour le logiciel R (R Development Core Team, 2016) permet le calcul des incertitudes de prédiction (ici l'erreur standard

de prédiction – ES). Le modèle établi est ensuite appliqué au jeu de validation, sa précision est testée par calcul de l'erreur quadratique moyenne (ou RMSE), telle que (Eq. 3) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

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 (Ratio of Performance to Standard deviation), c'est-à-dire le rapport de la déviation standard de l'échantillon (SD) sur l'erreur de prédiction (i.e. la RMSE ; Eq. 4) :

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \quad (4)$$

Après la phase de validation, le modèle final est réajusté sur la totalité du set de données (jeux de calibration et de validation confondus).

4. SORTIES DU MODÈLE

2.3. Les outils cartographiques

Deux modèles validés sont obtenus selon la méthode de décrite en §3 (l'un pour les cultures, l'autre pour les prairies). Le script permet de les appliquer chacun à la pile des co-variables environnementales afin de rasteriser les valeurs de COT et les incertitudes de prédiction associées (ES) sur l'ensemble du territoire agricole. Ces rasters provisoires sont ensuite combinés dans l'espace en tenant compte de l'occupation du sol afin de produire les rasters finaux au format geoTiff correspondant à :

- la carte des teneurs en carbone organique total (%C), i.e. **CARBIOSOL – Teneurs prédites en Carbone organique total – période XXXX-YYYY** dans METAWAL ;
- la carte des erreurs de prédiction associées (erreur standard ES en %C) ;
- la carte des erreurs relatives de prédiction (en %, i.e. coefficient de variations CV autour de la valeur estimée), i.e. **CARBIOSOL – Incertitudes des Teneurs en Carbone organique total – période XXXX-YYYY** dans METAWAL.

La résolution et l'étendue spatiale de ces couches sont exactement les mêmes que celles des couches des covariables utilisées dans les modèles affinés ici (Tableau 3), et que celles des cartes des teneurs en COT de la série originale CARBIOSOL publiée sur le géoportail en 2017.

2.4. Les métadonnées : pour un encodage dans METAWAL

Les métadonnées des cartes de la série CARBIOSOL sont encodées dans METAWAL – le catalogue pour l'information géographique en Wallonie (<http://metawal.wallonie.be>). Elles sont ainsi standardisées et en conformité avec la directive européenne INSPIRE.

Dans le cadre de la mise à jour des cartes de COT, les fiches de métadonnées associées seront également mises à jour par la cellule SIG du SPW. Les méthodologies de cartographie restant les

mêmes que les cartes dont les métadonnées sont déjà encodées dans METAWAL, il suffira alors de reprendre ses fiches et de modifier seulement quelques informations, comme :

- La période concernée ;
- La source des données avec le numéro de licence associé ;
- Les co-variables sélectionnées durant le processus de modélisation.

Le script permet donc d'extraire un fichier texte contenant les informations nécessaires à la mise à jour des fiches de métadonnées des cartes produites ici (§6.3.3).

3. Transfert des CARTES et métadonnées DE REQUASUD AU service SIG du SPW

La mise à jour des cartes des teneurs en COT pour les sols agricoles sera réalisée soit **(A)** lorsque le SPW jugera nécessaire d'effectuer une mise à jour des cartes, soit **(B)** à l'initiative de REQUASUD.

Dans le cas **(A)**, le SPW devra par l'intermédiaire de la Cellule SIG de la DGO3 lancer la procédure décrite ci-dessous auprès de REQUASUD.

1/ **La Cellule SIG de la DGO3 effectuera une demande officielle auprès de la cellule de coordination de REQUASUD** (Rue de Liroux, 9 – 5030 Gembloux ; +32 81 87 58 96 ; Requasud@cra.wallonie.be). Celle-ci devra préciser les produits demandés en donnant explicitement le nom repris dans les métadonnées, i.e. **CARBIOSOL – Teneurs prédites en Carbone organique total – période XXXX-YYYY** et **CARBIOSOL – Incertitudes des Teneurs en Carbone organique totale – période XXXX-YYYY**, et préciser la période pour laquelle ces cartes doivent être produites (année de début XXXX – année de fin YYYY).

2/ **REQUASUD vérifiera la disponibilité et la répartition spatiale des teneurs en COT**, i.e. si celles-ci sont déjà toutes encodées dans la BDD centralisée de REQUASUD, et si leur répartition spatiale couvre toute la Wallonie (minimum 30 observations par région agricole, exceptée pour la Campine Hennuyère). Si ce n'est pas le cas, la période pourra être redéfinie en accord avec la Cellule SIG de la DGO3.

3/ **REQUASUD rédigera alors une convention** qui sera signée par les deux parties (DGO3 et REQUASUD) et qui disposera d'un numéro de licence unique. Ce numéro de licence devra impérativement être signifié lors de chaque utilisation/édition de ces cartes, par exemple à travers le géoportail, l'EEW ou bien encore lors d'une présentation des dites cartes auprès de potentiels utilisateurs.

4/ **REQUASUD produira et validera les cartes demandées** sur base des scripts informatiques qui lui ont été fournis par C. Chartin de l'équipe CARBIOSOL, et suivant les instructions de ce guide d'utilisation.

5/ Une fois les cartes produites, **REQUASUD fournira les fichiers suivants à la Cellule SIG de la DGO3**, en mains propres (clé USB) ou par l'intermédiaire d'un outil de transfert de fichiers volumineux :

- la carte des teneurs en carbone organique total (%C) au format geoTiff, i.e. **CARBIOSOL – Teneurs prédites en Carbone organique total – période XXXX-YYYY** dans METAWAL ;
- la carte des erreurs de prédiction associées (erreur standard ES en %C) au format geoTiff ;
- la carte des erreurs relatives de prédiction (en %, i.e. coefficient de variations CV autour de la valeur estimée) au format geoTiff, i.e. **CARBIOSOL – Incertitudes des Teneurs en Carbone organique total – période XXXX-YYYY** dans METAWAL ;
- et le fichier texte d'informations pour la mise à jour des fiches de métadonnées.

Les cartes répondront aux critères de format, de résolution et d'étendue spatiale décrits dans le tableau 3 (§2.2) de ce guide.

6/ La Cellule SIG de la DGO3, après consolidation et publication, informera REQUASUD de la mise en ligne des cartes sur le Géoportail.

Dans le cas **(B)** où REQUASUD désire publier les cartes des teneurs en COT récemment mises à jour par leur soin, la cellule de coordination de REQUASUD devra contacter la cellule SIG de la DGO3 afin de leur faire part de leur demande (Avenue Prince de Liège, 15, B-5100 Namur ; contact suggéré : P. Engels +32 81 33 60 27 ; patricke.engels@spw.wallonie.be). Dès lors, une licence pourra être éventuellement rédigée et il s'agira de suivre les étapes 5 et 6 du protocole décrit ci-dessus.

4. R et les scripts informatiques

4.1. *Installation des éléments software nécessaire pour le run des scripts*

Afin de pouvoir appliquer la méthode décrite dans les chapitres précédents, un répertoire R_RQS est fourni, contenant différents répertoires et fichiers (Figure 2).

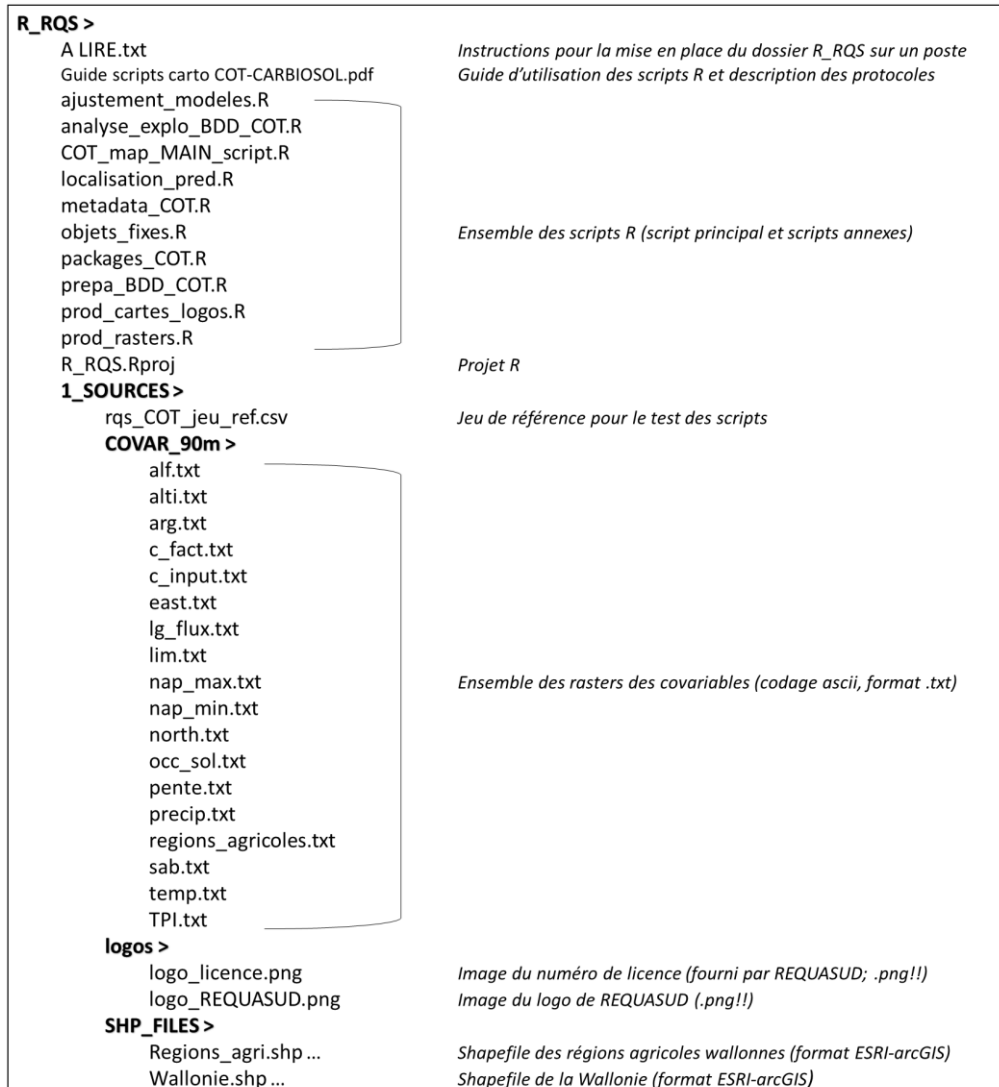


Figure 2. Structure et contenu du répertoire R_RQS fourni pour la procédure de mise à jour des cartes de COT.

Installer ces fichiers sur votre poste de travail dans un nouveau répertoire que vous nommerez à votre guise. Puis, installer dans l'ordre suivant :

- Le logiciel R (<http://cran.r-project.org/>)
- Le logiciel RStudio (<http://www.rstudio.com/products/rstudio/download/>)

Dès lors, installer les packages nécessaires pour le fonctionnement des scripts. Pour ceci, ouvrir RStudio et utiliser l'outil Install proposé dans l'onglet 'packages' dans la fenêtre en bas à droite de l'interface. *Un package correspond à un ensemble de fonctions, codes informatiques et parfois données, sous un format bien défini.*

Si tous les éléments précédents sont déjà installés sur votre poste, veuillez à vérifier les mises à jour de chacun des éléments logiciels et packages.

4.2. Quelques généralités sur R et l'interface R-studio

R est un environnement intégré permettant de manipuler des données, effectuer des calculs, préparer des graphiques, et peut également être utilisé comme SIG (Système d'Information Géographique). R est avant tout un langage de programmation à part entière, inspiré du langage S et Scheme. Ce langage nécessite un 'interprète', c'est-à-dire un autre programme, qui exécutera les commandes. Le logiciel R est cet interprète.

Le logiciel R se présente essentiellement sous forme d'une invite de commande, aux capacités d'édition limitées, et d'une interface graphique basique (Fig. 3). Le logiciel offre quelques fonctionnalités additionnelles telle que l'installation de packages externes.

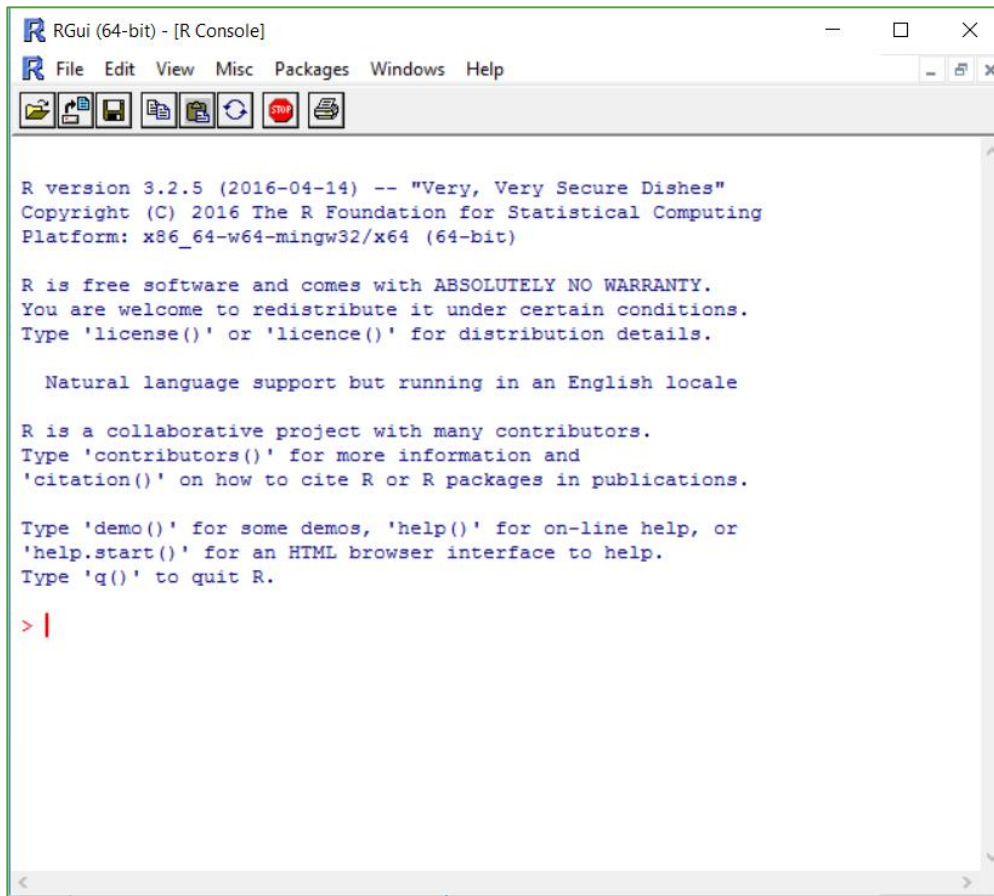


Figure 3. Fenêtre de la console sous Windows au démarrage de R.

Le logiciel R se présentant essentiellement sous forme d'une invite de commande, deux stratégies de travail existent :

1/ La stratégie 'code virtuel et objets réels'. On entre des expressions dans la ligne de commande pour les évaluer directement :

```
> 6*7/3  
[1] 14  
>
```

On peut aussi créer des objets contenant le résultat de calculs, et qui seront stockés en mémoire dans l'espace de travail de R :

```
> x <- exp(6)  
> x  
[1] 403.4288  
>
```

En fin de session de travail, **une image de l'espace de travail** est automatiquement sauvegardée sur le disque dur de l'ordinateur (sous forme du fichier **.Rdata**) afin de conserver les objets créés pour une future session de travail. Cette image est automatiquement chargée au prochain lancement de R. On peut également sauvegarder soi-même l'image de l'espace de travail par la fonction *save.image()*.

Le gros inconvénient de l'approche 'code virtuel et objets réels' est que le code utilisé pour créer les objets n'est pas sauvegardé d'une session à l'autre. Or, nous avons bien souvent besoin de code plus complexes que les exemples ci-dessus, et il est également important de savoir à quoi se rapporte l'objet 'x' (c'est-à-dire la valeur 403.4288).

2/ L'approche 'code réel et objets virtuels'. Inversement ici, on considère que le plus important à conserver d'une session à une autre de travail est le code et non les objets. On va donc sauvegarder les codes créés dans des **fichiers de scripts**, dont l'extension est **.R**.

Ainsi, on peut recréer les objets R quand nécessaire en recopiant le code conservé dans le fichier de script dans l'invite de commande.

```
## Fichier de script simple contenant des expressions R pour
## faire des calculs et créer des objets.
2 + 3

## Probabilité d'une loi de Poisson(10)
x <- 7
10^x * exp(-10) / factorial(x)

## Petite fonction qui fait un calcul trivial
f <- function(x) x^2

## Évaluation de la fonction
f(2)
```

```
R version 3.2.3 (2015-12-10) -- "Wooden Christmas-Tree"
Copyright (C) 2015 The R Foundation for Statistical Computing
Platform: x86_64-apple-darwin13.4.0 (64-bit)

[...]

> ## Fichier de script simple contenant des expressions R pour
> ## faire des calculs et créer des objets.
> 2 + 3
[1] 5
>
> ## Probabilité d'une loi de Poisson(10)
> x <- 7
> 10^x * exp(-10) / factorial(x)
[1] 0.09007923
>
> ## Petite fonction qui fait un calcul trivial
> f <- function(x) x^2
>
> ## Évaluation de la fonction
> f(2)
[1] 4
```

Voici schématiquement ce qu'un programmeur R a constamment sous les yeux, c'est-à-dire le fichier de script (en haut) et l'invite de commande (en bas) dans laquelle le code est exécuté.

Avertissement 1 !!

C'est l'approche d'interaction 'code réel et objets virtuels' avec R qui a été choisi ici, afin de pouvoir effectuer à sa guise des analyses statistiques, des graphiques, et des cartes, sur base des teneurs en COT de la base de données REQUASUD.

Dans notre cas, nous avons recours à des fichiers de scripts qui peuvent être longs, et parfois complexes. L'interface du logiciel R se limitant principalement à une invite de commande, l'édition de code R sera rendue plus facile en utilisant un éditeur de texte pour programmeur ou un environnement de développement intégré (**Integrated Development Environment, IDE**).

Ici, nous utiliserons un IDE nommé **Rstudio** (RStudio Team, 2015) créé spécifiquement pour travailler avec R. Cette interface est très conviviale et intuitive, et permet aisément de consulter ses fichiers de script, la ligne de commande R, les rubriques d'aide, les graphiques, etc. (Fig. 4).

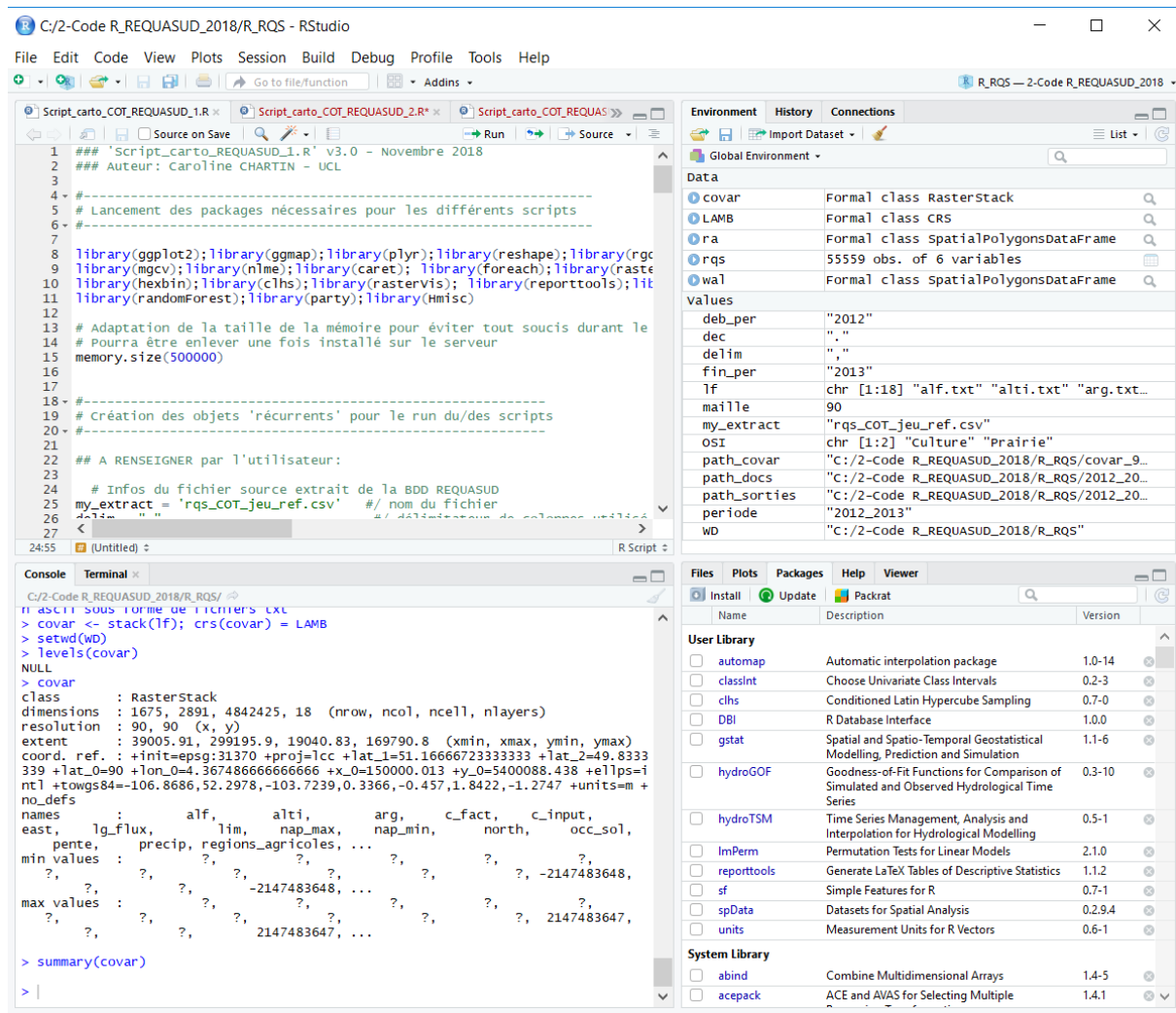


Figure 4. Interface R Studio (RStudio Team, 2015): en haut à gauche, on peut consulter les différents scripts, tableaux... ; en bas à gauche, se situe la console où les lignes de scripts sont lancées (en bleu), et où les résultats (en noir) et messages d'avertissement ou erreur (en rouge) sont affichés ; en haut à droite, on peut consulter l'environnement qui regroupe les différents objets existant dans le projet R et l'historique des lignes de codes lancées précédemment ; en bas à droite, on peut accéder aux dossiers et fichiers de l'ordinateur (files), afficher des graphiques et cartes (plots), lancer/télécharger des packages, appeler l'aide en ligne (help).

4.3. Structures et présentation des scripts

Le fonctionnement des scripts est illustré par des captures d'écran et différents documents produits via l'utilisation de ces scripts. Afin que l'utilisateur puisse se lancer aisément et vérifier leur bon fonctionnement, tous les exemples (captures d'écran, documents...) proposés ici découlent de l'analyse d'un seul et même set de données particulier (qu'on appellera 'set de référence'), et ce, pour une période particulière (qu'on appellera 'période de référence'). Ainsi, au fur et à mesure qu'on

avance dans le run d'un script, **l'utilisateur peut comparer les résultats qu'il obtient à ceux qui illustrent ce guide d'utilisation.**

Le **'jeu de référence'** correspond à une extraction de la base de données REQUASUD pour la période 2004-2015 (OccupSol de sol, annee, X, Y, COT) pour lequel les données de COT (% C) ont été modifiées par l'application d'un coefficient correcteur. De ce fait, les valeurs de COT ne sont pas réelles, mais possèdent les mêmes tendances spatiales et temporelles que le jeu de données original. La **'période de référence'** choisie s'étale de 2012 à 2013.

NB. Le fichier contenant le **'jeu de référence'** se nomme : **rqs_COT_jeu_ref.csv**

Avertissement 2 !!

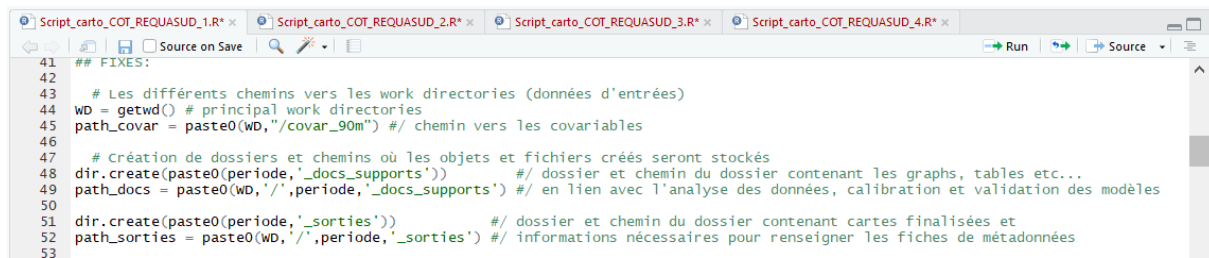
*Lorsqu'après l'exécution d'une ligne de code, un **message 'Warning'** s'affiche, cela signifie que le code, les fonctions codées, ont bien fonctionné, mais le logiciel R nous mets en garde sur le fait que, par exemple, un des paramètres codés n'a pas été rencontré.*

Avertissement 3 !!

*Lorsqu'après l'exécution d'une ligne de code, un **message 'Error'** s'affiche, cela signifie que le code, les fonctions codées, n'ont pas pu fonctionner. Le message d'erreur apportera des éléments qui vous permettront de comprendre le problème rencontré.*

En complément à ce manuel d'utilisation, de nombreux commentaires sont intégrés aux différentes scripts afin de guider au mieux l'utilisateur. Ces commentaires sont en verts dans les scripts et précédés du signe #. (Ce signe permet également de bloquer une ligne de code pour qu'elle ne soit pas lancée dans un run.)

➔ Exp.



```

41 ## FIXES:
42
43 # Les différents chemins vers les work directories (données d'entrées)
44 wd = getwd() # principal work directories
45 path_covar = paste0(wd, "/covar_90m") #/ chemin vers les covariables
46
47 # Création de dossiers et chemins où les objets et fichiers créés seront stockés
48 dir.create(paste0(periode, "_docs_supports")) #/ dossier et chemin du dossier contenant les graphs, tables etc...
49 path_docs = paste0(wd, "/", periode, "_docs_supports") #/ en lien avec l'analyse des données, calibration et validation des modèles
50
51 dir.create(paste0(periode, "_sorties")) #/ dossier et chemin du dossier contenant cartes finalisées et
52 path_sorties = paste0(wd, "/", periode, "_sorties") #/ informations nécessaires pour renseigner les fiches de métadonnées
53

```

4.3.1. structure relationnelle entre les scripts

La procédure de cartographie du COT nécessite différentes étapes à effectuer dans un ordre précis. L'ensemble de ces étapes représente plusieurs centaines de lignes de scripts. Afin de rendre la procédure plus conviviale, un script principal d'une cinquantaine de lignes a été créé ('COT_map_MAIN_SCRIPT.R') par lequel sont appelés des scripts annexes, comme on appellerait une fonction, contenant chacun un code relatif à une ou plusieurs étapes de la procédure (Fig. 5).

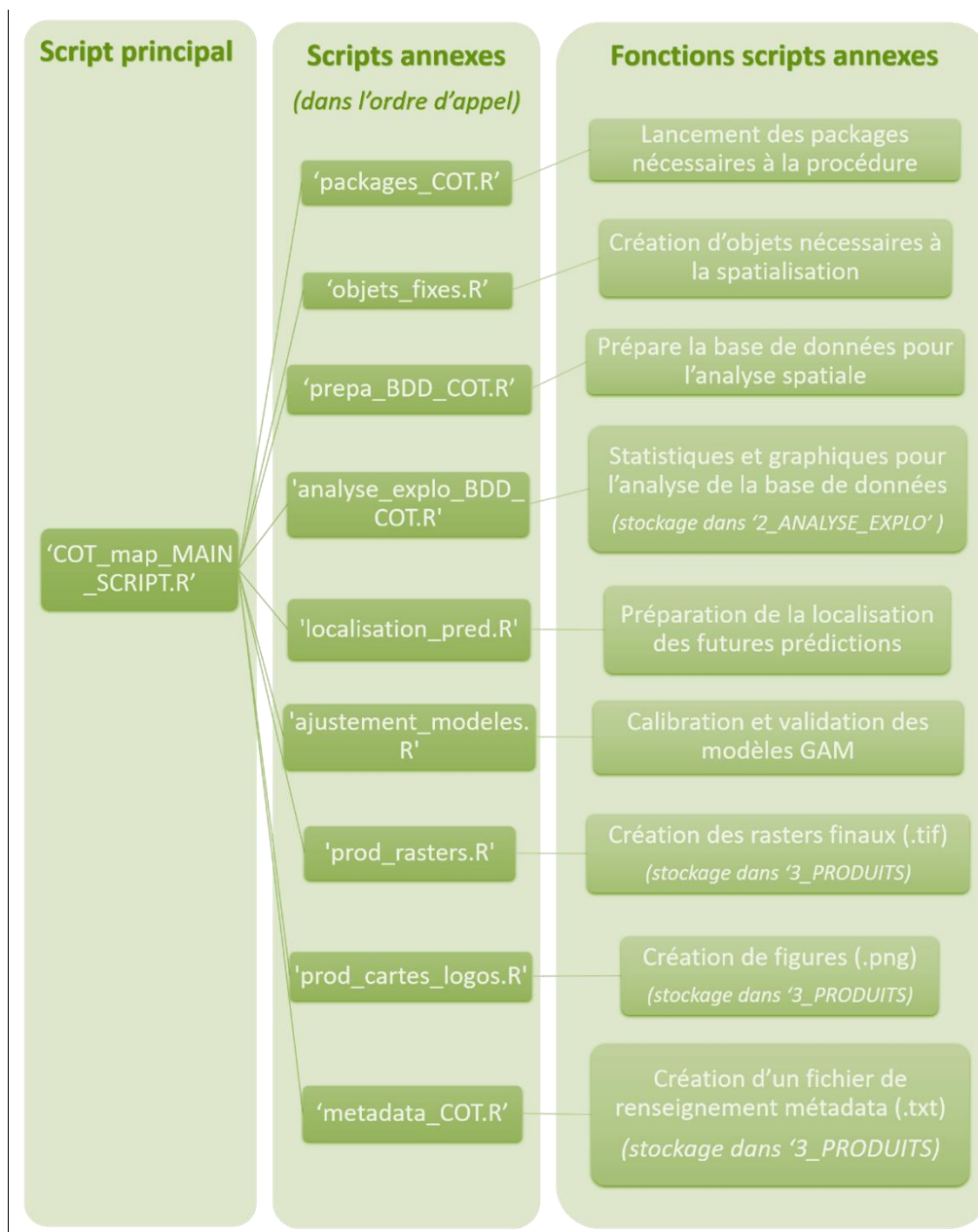


Figure 5 : Schéma de la structure relationnelle entre les différents scripts et fonctions des scripts annexes.

4.3.2. SCRIPT PRINCIPAL : `'COT_map_MAIN_SCRIPT.R'`

Il s'agit donc du seul script nécessaire d'ouvrir pour effectuer la procédure de cartographie. Ce script permet de faire appel aux scripts annexes et de les lancer à distance, comme l'appel d'une fonction. Les fenêtres à gauche de l'interface ne sont pas surchargées et l'esprit de l'utilisateur non plus !

```

1  ### 'COT_map_MAIN_SCRIPT.R' v2.0 - Decembre 2018
2  ### Auteure: Caroline CHARTIN - UCLouvain
3
4  ## Ce script est le SEUL script dont vous aurez besoin durant la procédure
5  ## Les étapes de la procédure de cartographie du COT sur base des données extraites de la BDD REQUASUD
6  ## se succèdent dans l'ordre et chacune va faire appel à un ou plusieurs scripts externes
7  ## qui seront lancés d'ici même (= pas de surcharge du script principal)
8
9  #### ATTENTION : lire les commentaires en haut et à droite de la ligne de commande avant de la lancer.
10 #### ATTENTION : le temps de run peut être indiqué quand > à 1 min - bien le respecter avant le run de la ligne suivante
11
12 # Création des chemins vers les différents répertoires
13 getwd();wd=getwd();setwd(wd)          ## work directory (lieu du projet .Rproj)
14 path_SRC=paste0(wd,'/1_SOURCES')      ## Données SOURCES
15 dir.create('2_ANALYSE_EXPLO'); path_EXPLO=paste0(wd,'/2_ANALYSE_EXPLO') ## Résultats de l'analyse exploratoire
16 dir.create('3_PRODUITS');path_PROD=paste0(wd,'/3_PRODUITS') ## Cartes, métadonnées
17 dir.create('temp'); path_temp=paste0(wd,'/temp') ## fichiers temporaires
18
19 source('packages_COT.R') ## lancement des packages
20
21 ## A RENSEIGNER (l. 21-33) par l'utilisateur puis faire le run de ces lignes :
22 # Infos du fichier source extrait de la BDD REQUASUD
23 my_extract = 'rqs_COT_jeu_ref.csv'    ## nom du fichier .csv extrait de la BDD centralisée REQUASUD
24 delim = ","                          ## délimiteur de colonnes utilisé dans le fichier
25 dec = "."                            ## séparateur décimal utilisé dans le fichier
26 # occupation de sol d'intérêt = OSI (mettre au singulier)
27 OSI <- c('Culture','Prairie')
28 # Infos sur la période d'intérêt
29 deb_per = '2012' ## début de la période
30 fin_per = '2013' ## fin de la période
31 periode = paste0(deb_per,'_',fin_per) ## renseignement de la période pour les légendes et noms de fichiers créés
32 # licence REQUASUD
33 licence_RQS = 'A06/2017'
34 # Valeur du côté de la maille carrée utilisée pour la cartographie (= maille des covariables)
35 maille = 90
36
37 source('objets_fixes.R') ## création d'objets fixes nécessaires à la procédure (empilement des covariables, shape files)
38 covar ## vérification de l'empilement des covariables
39
40 ## ETAPE 1: préparation de la base de données et exploration avant l'analyse spatiale
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99

```

!! Surlignées en bleu, les lignes dont le run est nécessaire !! Les lignes 1 à 10 apportent des informations à l'utilisateur, puis différents dossiers et chemins associés à ces dossiers sont créés (l. 12-17). Les packages sont lancés par l'appel à distance en ligne 19 du script 'packages_COT.R'. Ensuite, il est important de bien renseigner et vérifier les informations demandés dans les lignes 21 à 35. Pour finir, on appelle à distance le script 'objets_fixes.R' et on vérifie l'empilement des covariables (l. 37 et 38 ; Fig. 6).

```

C:/2-Code R/REQUASUD_2018/R_RQS/
UGK data source with driver: ESRI Shapefile
Source: "C:/2-Code R/REQUASUD_2018/R_RQS/1_SOURCES/SHP_FILES/Regions_agri.shp", layer: "Regions_agri"
with 10 features
It has 9 fields
> covar ## vérification de l'empilement des covariables
class      : RasterStack
dimensions : 1675, 2891, 4842425, 18  (nrow, ncol, ncell, nlayers)
resolution : 90, 90  (x, y)
extent     : 39005.91, 299195.9, 19040.83, 169790.8  (xmin, xmax, ymin, ymax)
coord. ref.: +init=epsg:31370 +proj=lcc +lat_1=51.1666672333333 +lat_2=49.8333339 +lat_0=90 +lon_0=4.367486666666666 +x_0=150000.013 +y_0=5400088.438 +ellps=intl +towgs84=-106.8686,52.2978,-103.7239,0.3366,-0.457,1.8422,-1.2747 +units=m +no_defs
names      : alf, north, alti, arg, c_fact, c_input, east, lg_flux, lim, n
ap_max,    nap_min,    north,    occ_sol,    pente,    precip,    regions_agricoles, ...
min values : ?, ?, ?, -2147483648, ?, ?, ?, -2147483648, ...
max values : ?, ?, ?, 2147483647, ?, ?, ?, 2147483647, ...
> |

```

Figure 6 : Sortie de la console (en bas à droite) pour la vérification de l'empilement des couches spatialisées des covariables (l.35 et 36 du script principal).

```

32 # licence REQUASOL
33 licence_RQS = 'A06/2017'
34 # valeur du côté de la maille carrée utilisée pour la cartographie (= maille des covariables)
35 maille = 90
36
37 source('objets_fixes.R') #/ création d'objets fixes nécessaires à la procédure (empilement des covariables, shape files)
38 covar #/ vérification de l'empilement des covariables
39
40 ## ETAPE 1: préparation de la base de données et exploration avant l'analyse spatiale
41 source('prepa_BDD_COT.R') #/ ~3min : préparation de la BDD
42 head(db); summary(db); dim(db) #/ vérification de la structure de la BDD
43 #/ consultables dans le répertoire (tmp)
44
45 source('analyse_explo_BDD_COT.R') #/ création de graphs, tables résumant/illustrant la BDD et les relations entre COT et covariables
46 #/ consultables dans le répertoire (2_ANALYSE_EXPLO)
47
48 ## ETAPE 2: analyse spatiale et modélisation
49 source('localisation_pred.R') #/ ~3min : préparation de la localisation des futures prédictions (temp)
50 # = création de la matrice x; voir dans Environnement - section Data (fenêtre en haut à droite)
51 source('ajustement_modeles.R') #/ ~ 40min : analyse , ajustement d'un modèle par occupation de sols sur toute la wallonie (temp)
52 #/ consultables dans le répertoire (tmp)
53
54 # ETAPE 3: production des sorties (rasters, documents .png, informations pour la mise à jour des metadonnées-METAWAL)
55 source('prod_rasters.R') #/ ~1-2min : production des rasters finaux au format .tif (GeoTiff)
56 source('prod_cartes_logos.R') #/ ~1-2min : création de fichiers .png pour première visualisation des cartes
57 source('metadata_COT.R') #/ Création d'un fichier texte regroupant les infos pour la mise à jour des fiches de métadonnées
58 #/ l'ensemble des sorties sont dans le répertoire 3-PRODUITS
59
60 #-----FIN-----

```

Les lignes 40 à 58 font successivement appel à des scripts annexes afin de procéder aux différentes grandes étapes de la procédure (1. La préparation de la base de données ; 2 : l'analyse spatiale et la modélisation ; 3 : la production des sorties sous format .tif et .png, et d'un fichier texte pour les éléments de métadonnées). La ligne 42 permet de vérifier la structure de la base de données préparée en étape 1 pour l'analyse spatiale (Fig. 7).

```

Console Terminal
C:/2-Code R_REQUASUD_2018/R_RQS/
metadonnees
> #/ l'ensemble des sorties sont dans le repertoire 3-PRODUITS
> head(db); summary(db); dim(db) #/ verification de la structure de la BDD
  x          y      cot occupSol    alf    alti    arg c_fact  c_input    east lg_flux
1 185055.8 95457.03 8.69640 culture 0.4397544 247.1969 0.1807400 0.38 0.9832926 -0.8833162 368182.6
2 191105.2 148456.64 4.34820 culture 0.4189458 143.4064 0.1628275 0.38 0.4821590 -0.4292718 136796.7
3 152865.0 141660.00 3.98585 culture 0.3911150 144.2290 0.1465195 0.40 0.4901526 0.9314813 114047.7
4 141191.0 108620.00 5.07290 culture 0.4453416 195.4810 0.1431854 0.45 0.4874195 -0.3191729 397730.2
5 141588.0 108506.00 4.71055 culture 0.4446499 196.6555 0.1426568 0.45 0.4874195 0.3174363 399018.5
6 188289.0 148965.00 3.62350 culture 0.3804280 131.1440 0.1316545 0.46 0.3350701 0.9419673 137492.3
  lim nap_max nap_min north occ_sol pente precip regions_agricoles sab temp
1 0.6005214 1.5 1.3500000 0.4687777 100 4.0248828 942.0471 Famenne 0.21873860 10.07299
2 0.7809313 1.5 1.3500000 0.9031754 100 1.4549690 889.8765 Limoneuse 0.05624127 10.67851
3 0.7576325 1.5 1.3500000 -0.3637893 100 0.8025183 907.3240 Sablo-limoneuse 0.09584805 10.67038
4 0.7853307 1.5 0.5611111 0.9476965 100 1.8565069 948.1647 Limoneuse 0.07148394 10.37411
5 0.7854156 1.5 0.6472222 0.9482796 100 1.5269660 948.9901 Limoneuse 0.07192753 10.36753
6 0.7853259 1.4 1.2166671 0.3357046 100 1.2604970 886.1187 Limoneuse 0.08301958 10.72429
TPI
1 -5.0272670
2 1.0991060
3 1.7733310
4 0.5054169
5 -0.2471771
6 0.2310333

Console Terminal
C:/2-Code R_REQUASUD_2018/R_RQS/
  x          y      cot    occupSol    alf    alti
Min. : 71836 Min. : 22476 Min. : 1.892 Culture:6892 Min. : 0.08232 Min. : 12.99
1st Qu.:153258 1st Qu.:124579 1st Qu.: 3.623 Prairie:1043 1st Qu.:0.36489 1st Qu.:117.45
Median :178033 Median :143639 Median : 4.348 1st Qu.:0.39242 Median :144.28
Mean :178995 Mean :136059 Mean : 5.688 Mean :0.40558 Mean :169.78
3rd Qu.:201976 3rd Qu.:150780 3rd Qu.: 5.906 3rd Qu.:0.44437 3rd Qu.:205.40
Max. :294498 Max. :166178 Max. :28.227 Max. :0.78242 Max. :624.87

  arg    c_fact    c_input    east    lg_flux    lim
Min. :0.03278 Min. :0.0100 Min. :0.005262 Min. : -1.00000 Min. : 79495 Min. :0.1346
1st Qu.:0.13061 1st Qu.:0.3009 1st Qu.:0.482782 1st Qu.: -0.59012 1st Qu.:112384 1st Qu.:0.6689
Median :0.14147 Median :0.3700 Median :0.605890 Median : 0.06904 Median :173283 Median :0.7547
Mean :0.14798 Mean :0.3258 Mean :0.700072 Mean : 0.04148 Mean :225941 Mean :0.7162
3rd Qu.:0.16394 3rd Qu.:0.4400 3rd Qu.:0.906405 3rd Qu.: 0.67915 3rd Qu.:328447 3rd Qu.:0.7749
Max. :0.46680 Max. :0.5500 Max. :1.794325 Max. : 1.00000 Max. :718438 Max. :0.8179

  nap_max    nap_min    north    occ_sol    pente    precip
Min. :0.200 Min. :0.000 Min. : -1.0000 Min. :100.0 Min. : 0.0166 Min. : 826.2
1st Qu.:1.500 1st Qu.:1.117 1st Qu.: -0.6075 1st Qu.:100.0 1st Qu.: 0.9959 1st Qu.: 885.9
Median :1.500 Median :1.350 Median : 0.3076 Median :100.0 Median : 1.5549 Median : 905.8
Mean :1.491 Mean :1.198 Mean : 0.1388 Mean :144.7 Mean : 1.9407 Mean : 925.7
3rd Qu.:1.500 3rd Qu.:1.350 3rd Qu.: 0.8583 3rd Qu.:100.0 3rd Qu.: 2.4309 3rd Qu.: 943.3
Max. :1.500 Max. :1.400 Max. : 1.0000 Max. :888.0 Max. :14.5023 Max. :1327.8

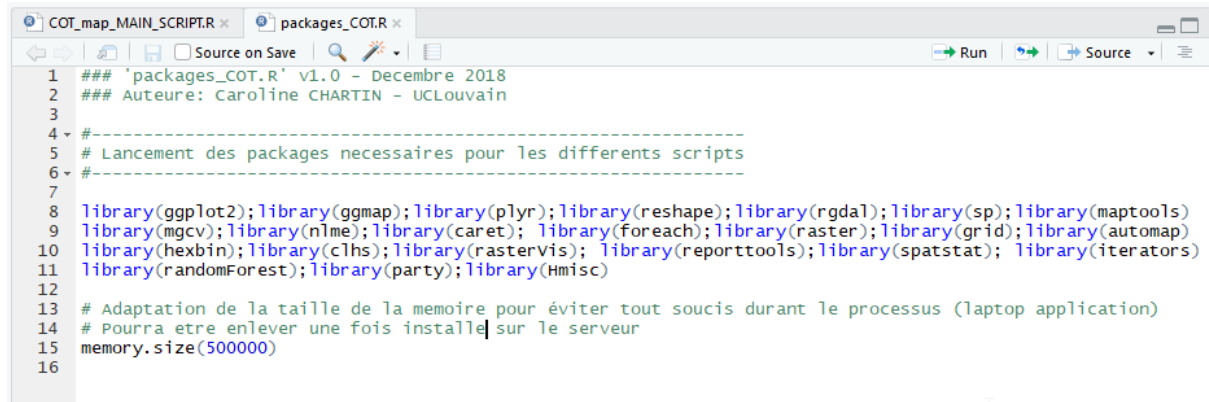
  regions_agricoles sab temp TPI
Limoneuse :3626 Min. :0.05385 Min. : 8.097 Min. : -30.93600
Sablo-limoneuse :1706 1st Qu.:0.08482 1st Qu.:10.330 1st Qu.: -1.78623
Condroz :1381 Median :0.10131 Median :10.655 Median : 0.02774
Famenne : 410 Mean :0.13583 Mean :10.518 Mean : -0.06543
Herbagère Liege: 378 3rd Qu.:0.16575 3rd Qu.:10.809 3rd Qu.: 1.80543
Ardenne : 323 Max. :0.82367 Max. :11.374 Max. : 22.90790
(other) : 111
[1] 7935 22
>

```

Figure 7 : Sorties de la console (en bas à droite) pour la vérification de la structure de la base de données préparée pour l'analyse spatiale (I.40 du script principal). La fonction head() donne les 6 premières lignes de la base, la fonction summary() propose de rapides statistiques et dim() donne la dimension de la base (lignes, colonnes).

4.3.3. SCRIPTS ANNEXES

Ces scripts annexes sont appelés via des lignes de commande dans le script principal 'COT_map_MAIN_SCRIPT.R' (§6.3.2) (fonction 'source()'). Leur run est donc lancé à distance au moment opportun de la procédure. Les scripts annexes sont présentés succinctement ci-dessous dans leur ordre de run au fil de la procédure :

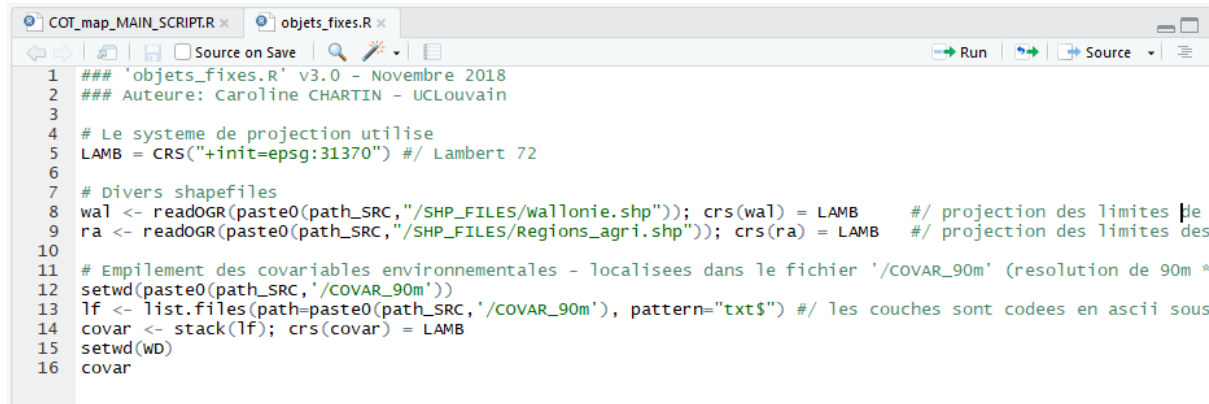


```

1  ### 'packages_COT.R' v1.0 - Decembre 2018
2  ### Auteur: Caroline CHARTIN - UCLouvain
3
4  #-----
5  # Lancement des packages necessaires pour les differents scripts
6  #-----
7
8  library(ggplot2);library(ggmap);library(plyr);library(reshape);library(rgdal);library(sp);library(maptools)
9  library(mgcv);library(nlme);library(caret); library(foreach);library(raster);library(grid);library(automap)
10 library(hexbin);library(clhs);library(rastervis); library(reporttools);library(spatstat); library(iterators)
11 library(randomForest);library(party);library(Hmisc)
12
13 # Adaptation de la taille de la memoire pour éviter tout soucis durant le processus (laptop application)
14 # Pourra etre enlever une fois installé sur le serveur
15 memory.size(500000)
16

```

Le script 'packages_COT.R' permet de lancer les packages nécessaires à la procédure. Il est appelé en l. 19 du script principal.



```

1  ### 'objets_fixes.R' v3.0 - Novembre 2018
2  ### Auteur: Caroline CHARTIN - UCLouvain
3
4  # Le systeme de projection utilise
5  LAMB = CRS("+init=epsg:31370") #/ Lambert 72
6
7  # Divers shapefiles
8  wal <- readOGR(paste0(path_SRC,"/SHP_FILES/wallonie.shp")); crs(wal) = LAMB #/ projection des limites de
9  ra <- readOGR(paste0(path_SRC,"/SHP_FILES/Regions_agri.shp")); crs(ra) = LAMB #/ projection des limites des
10
11 # Empilement des covariables environnementales - localisees dans le fichier '/COVAR_90m' (resolution de 90m *)
12 setwd(paste0(path_SRC,"/COVAR_90m"))
13 lf <- list.files(path=paste0(path_SRC,"/COVAR_90m"), pattern="txt$") #/ les couches sont codees en ascii sous
14 covar <- stack(lf); crs(covar) = LAMB
15 setwd(wd)
16 covar

```

Le script 'objets_fixes.R' définit des objets nécessaires à la spatialisation que ce soit lors de la modélisation ou la création de figures propres, i.e. le système de projection, les shapefiles de la Wallonie et des régions agricoles, et l'empilement de covariables spatialisées localisées dans le répertoire '1_SOURCES > COVAR_90m'. Ce script est appelé en ligne 35 du script principal.

```

COT_map_MAIN_SCRIPT.R x   prepa_BDD_COT.R x
Source on Save  Run  Source
1  ### 'prepa_BDD_COT.R' - v2.0 - Decembre 2018
2  ### Auteurs: Caroline CHARTIN - UCLouvain
3
4  -----
5  # Preparation de la base de donnees pour l'analyse spatiale et la cartographie
6  -----
7
8  # lecture de la table de donnees extraite de la BDD centralisee REQUASUD
9  rqs <- read.csv(paste0(path_SRC, '/', my_extract), row.names=NULL, sep=delim, dec=dec)  #/ lecture brute du f
10 rqs$COT <- as.numeric(as.character(rqs$COT))  #/ s'assure que les donnees carbone sont bien lues
11 #/ comme des nombres et non des caracteres
12
13 # selection des sites sous les occupations de sol d'interet (OSI) et simplification des labels
14 rqs <- foreach (i = OSI, .combine = rbind)%do%{
15   tmp <- rqs[grepl(i, rqs$occupsol),]
16   tmp$occupsol <- as.factor(i)
17   tmp
18 }
19
20 # On extrait un sous-jeu de la table en fonction de la periode temporelle que l'on veut etudier
21 rqs_per <- subset(rqs, rqs$annee >= deb_per & rqs$annee <= fin_per) # fonctionne avec les operateurs logiqu
22
23 # Remplacement des clusters (= plusieurs points regroupes dans une perimetre ~ equivalent a la taille de ce
24 # --> même parcelle, différentes années de mesures
25 # --> plusieurs mesures sur une exploitation et un unique georeferencement (= couple X, Y)
26 rqs_per_nc <- foreach (i = OSI, .combine = rbind)%do%{
27   spdf <- subset(rqs_per, rqs_per$occupsol==i)
28   coordinates(spdf) = ~X+Y; crs(spdf) = LAMB
29   spdf <- spdf[complete.cases(over(spdf, wal)),]
30
31   chc <- hclust(dist(data.frame(row.names=row.names(spdf@data), x=coordinates(spdf)[,1], y=coordinates(spdf)
32     method="complete"))
33   chc.d <- cutree(chc, h=maille); spdf@data <- data.frame(spdf@data, clust=chc.d)
34   plot(wal); plot(spdf, col=factor(spdf@data$clust), pch=19, add=T)
35   box(col="black"); title(main=paste0('clustering_', i))
36
37   db_clust <- as.data.frame(spdf)
38   db_clust$clust <- factor(x = db_clust$clust)
39   head(db_clust); summary(db_clust); dim(db_clust)
40
41   ## remplacement des clusters par une observation moyennee
42   statx <- cast(clust ~ ., value = "X", data=db_clust, fun=mean)
43   staty <- cast(clust ~ ., value = "Y", data=db_clust, fun=mean)
44   statCOT_g <- cast(clust ~ ., value = "COT", data=db_clust, fun=mean)
45   stat <- merge(statx, staty, by="clust")
46   stat <- merge(stat, statCOT_g, by="clust")
47   stat <- rename(stat, c("(all).x"="X", "(all).y"="Y", "(all)"="COT"))
48   stat$occupsol <- i
49   stat
50 }
51 rqs_per_nc <- rqs_per_nc[-1]
52
53 < -----
54
55 22:1 (Untitled)  R Script
56
57 52
58 # Extracation des valeurs des covariables aux points de mesures COT
59 spdf <- rqs_per_nc; coordinates(spdf) = ~X+Y; crs(spdf) = LAMB  #/ on projette les observations (spatial poi
60 db <- data.frame(as.data.frame(spdf), extract(covar, spdf))  #/ on extrait les valeurs des covariables au
61 db <- na.omit(db)  # on elimine les points où certaines valeurs de covariables ne sont pas disponibles
62
63 # Labelisation des données qualitatives: regions agricoles
64 db$regions_agricoles <- factor(x=db$regions_agricoles, levels=c(1:10), labels=c("Sablo-limoneuse", "Limoneuse",
65   "Herbagere Fagnes", "Famenne
66
67 setwd(path_temp)
68 save(db, file=paste0("db_", periode, ".Rdata")) #/ on sauvegarde la base de donnees prete pour l'analyse spat
69 setwd(WD)
70
71 < -----
72
73 22:1 (Untitled)  R Script

```

Le script 'prepa_BDD_COT.R' permet, à partir du fichier d'extraction de la BDD centralisée de REQUASUD, d'extraire les données adéquates à l'analyse et de proposer une base de données adaptée et propre pour l'analyse spatiale et la modélisation. La base produite est alors enregistrée dans le répertoire 'temp'. La ligne 40 du script principal permet de sortir sur la console les informations nécessaires à la vérification de cette base de données (Fig. 7). Ce script est appelé en ligne 39 du script principal.

```

COT_map_MAIN_SCRIPT.R analyse_explo_BDD_COT.R
Source on Save Run Source
1 ### 'analyse_explo_BDD_COT.R v2.0 - Decembre 2018
2 ### Auteur: Caroline CHARTIN - UCLouvain
3
4 #-----
5 # Analyse exploratoire (pour les curieux, les geo-analystes, pour obtenir quelques graphs et statistiques
6 #-----
7
8 # Appel de la base de données creee dans le script 'prepa_BDD_COT.R'
9 setwd(path_temp)
10 load(file=paste0("db_",periode,".Rdata"))
11 db = as.data.frame(db)
12 setwd(wd)
13
14 ## Histogrammes de valeurs
15 ggplot(data=subset(db,occupsol%in%OSI),aes(x=COT, fill=..count..)) +
16   geom_histogram(aes(y = ..count..),col="black",binwidth=0.5) +
17   scale_fill_gradient("Count", low = "green3", high = "firebrick2") + facet_wrap(~occupsol) + theme_bw() +
18   labs(x=paste0("REQUASUD: COT ",periode," / %")) + scale_x_continuous() +
19   ylab("Observations (n)") + theme(legend.position="none")
20 ggsave(paste0(path_EXPLO,"/histogramme_",periode,"_COT.png"),w=10,h=7)
21
22 ggplot(db,aes(x=COT, fill=occupsol)) + geom_histogram(aes(y = ..count..),col="black", binwidth=0.5) +
23   theme_bw() + labs(x=paste0("REQUASUD: COT ",periode," / %")) + scale_x_continuous() +
24   ylab("observations (n)") + theme(legend.position="top")
25 ggsave(paste0(path_EXPLO,"/histogramme2_",periode,"_COT.png"),w=5,h=7)
26
27
28 ## Production des statistiques descriptives par occupations de sols et regions agricoles
29 Q1 <- function (x) quantile(x,0.25)
30 Q3 <- function (x) quantile(x,0.75)
31
32 ## format csv
33 foreach(lu = OSI)%do%{
34   #
35 }
36
37 ## format box-plots
38 ytitle<-paste("REQUASUD : COT ",periode," / %")
39 ggplot(db,aes(y=COT,x=factor(regions_agricoles),fill=factor(regions_agricoles))) + geom_boxplot() +
40   facet_wrap(~occupsol, scales="fixed") + theme_bw() + labs(x="",y=ytitle) + theme(legend.position="none")
41   theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, hjust = 1))
42 ggsave(paste0(path_EXPLO,"/boxplot_COT_",periode,".png"), w=7, h=5)
43
44
45 ## exploration des relations entre texture et COT
46 foreach(txt = c("alf","arg","lim","sab"))%do%{
47   #
48 }
49
50 ## exploration des relations (linéaires) entre attributs morphometriques / covariables sols et le COT
51 foreach(type = c("covar","morpho"))%do%{
52   #
53 }
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112 #-----
113 # Cartes des valeurs observees
114 #-----
115
116 # Determination des parametres d'echelle de valeurs pour les graphiques
117 up <- function (x) quantile(x,0.995)
118 M = round(up(db$COT),0)
119 s = M/8
120 sqc = round(seq(0,s*8,s),2)
121
122 ## Cartes des valeurs observees
123 myscale <- list(alternating=3,y = list(lim=c(10000,180000),at=seq(50000,150000,50000)),
124   x=list(lim=c(40000,310000),at=seq(50000,300000,50000)))
125 mylayout <- latticeExtra::layer(sp.polygons(ra, lwd=0.8, col='darkgray')) + latticeExtra::layer({SpatialP
126 my.palette <- brewer.pal(n = 9, name = "YlOrBr")
127
128 coordinates(db)=X+Y
129 luname<-OSI
130 ls <- foreach(i = 1:2)%do%{
131   lus<-OSI [i]
132   z <- spplot(subset(db,occupsol==lus),zcol="COT",scales=myscale,axis=axis.grid,cuts=c(sqc),col.regions=mys
133     auto.key=list(columns=3,space="top",title=paste0("REQUASUD: COT ",periode," / %"),cex.title=
134   }
135   ls <- do.call(c,ls)
136   ls$strip <- strip.custom(factor.levels=luname,bg="grey80")
137   png(paste0(path_EXPLO,"/cartes_observations_COT_",periode,".png"),res=300,w=7,h=8,units="in")
138   print(ls)
139   dev.off()
140 }

```

Le script ‘analyse_explo_BDD_COT.R’ crée des statistiques et documents type histogramme, box-plot, point-plot permettant d’explorer la base de données créées dans le script précédent (Fig. 8-9). Il permet également de créer une carte des observations (Fig. 10). Les sorties de ce script sont stockées dans le répertoire ‘2_ANALYSE_EXPLO’. Ce script est appelé en ligne 43 du script principal.

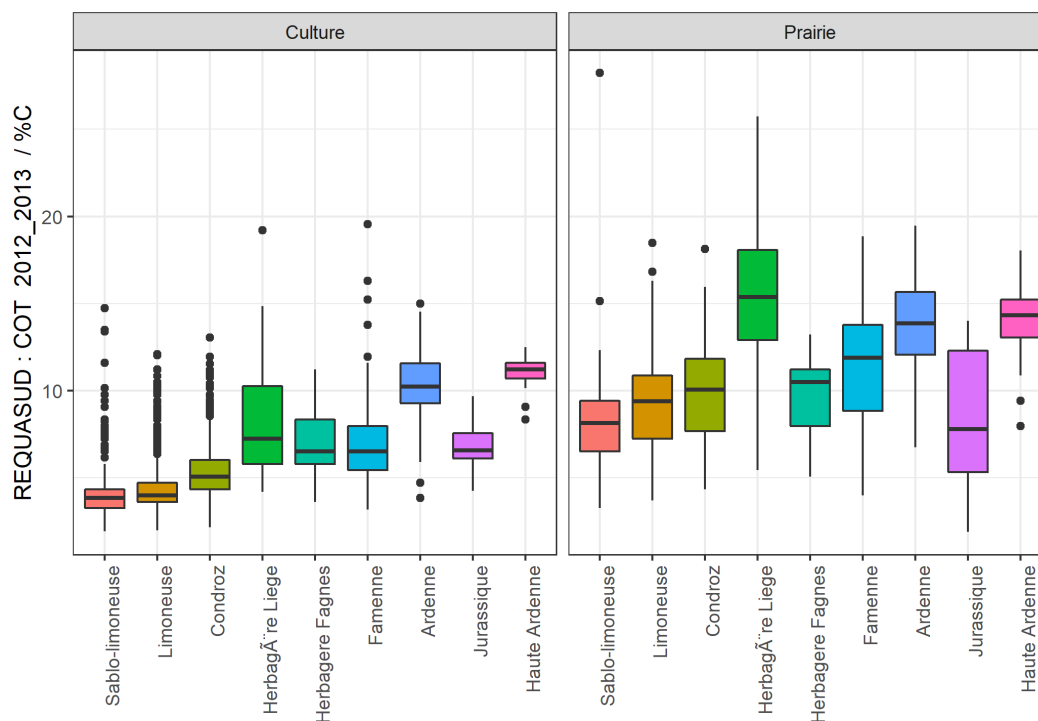


Figure 8. Exemple de graphique type ‘box-plot’ (boite à moustache) qui peuvent être produits via le code du script ‘analyse_explo_BDD_COT.R’. (valeurs de COT non réelles)

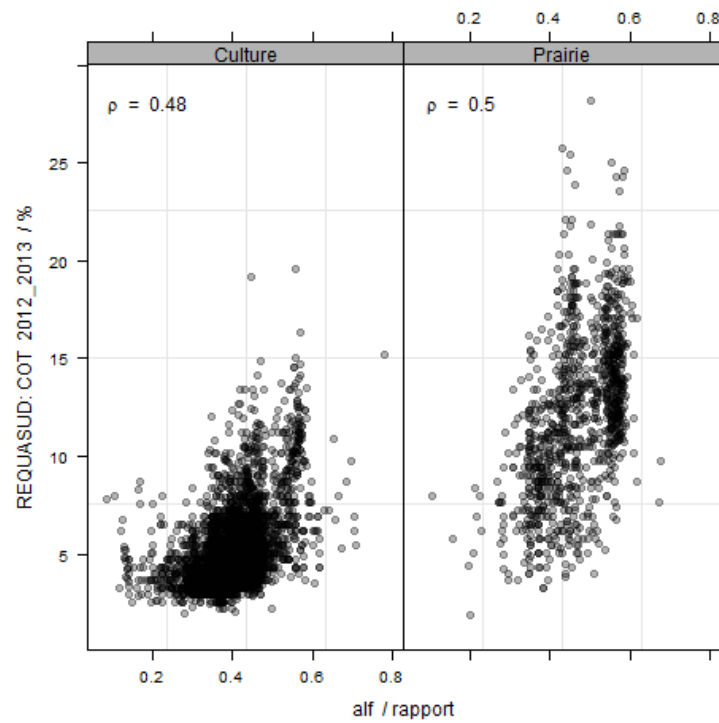


Figure 9. Exemple de graphique type 'point-plot' qui peuvent être produits via le code du script 'analyse_explo_BDD_COT.R'. (valeurs de COT non réelles ; alf = proportion relative à 1 d'argiles et limons fins dans le sol)

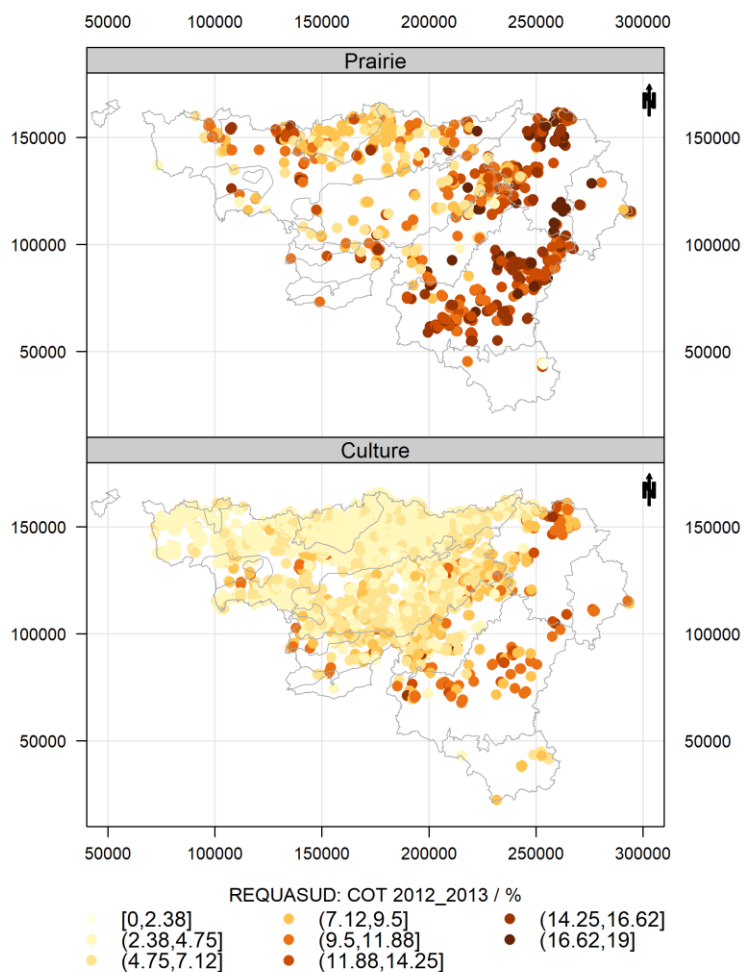


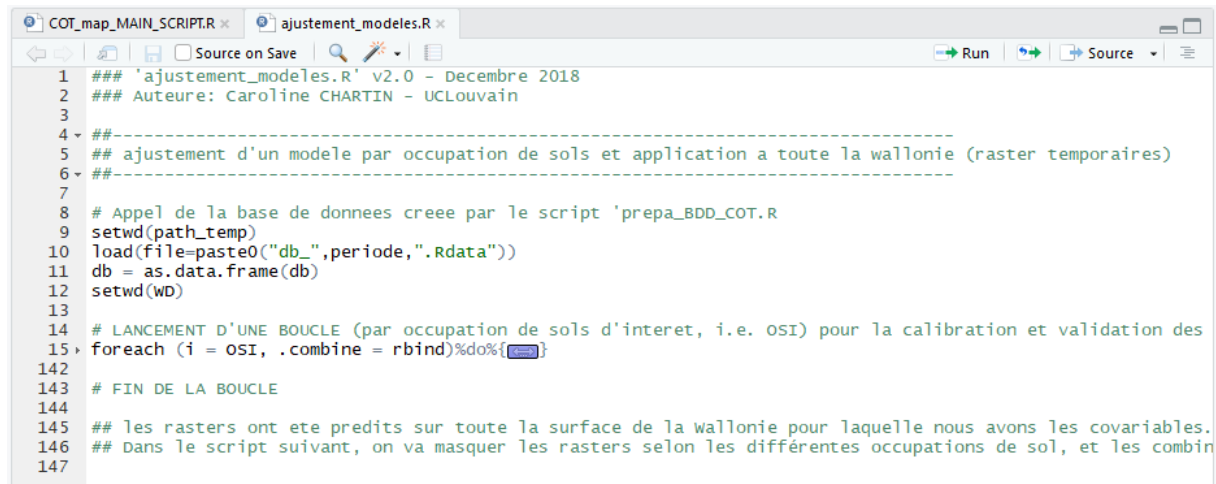
Figure 10. Exemple de carte de répartition des points d'observations qui peuvent être produites via le script 'analyse_explo_BDD_COT.R'. (valeurs de COT non réelles)

```

1  ### 'localisation_pred.R' v1.0 - Decembre 2018
2  ### Auteur: Caroline CHARTIN - UCLouvain
3
4  # Preparation de la localisation des predictions (c'est a dire toute la surface wallonne pour laquelle nous a
5  XY<- expand.grid(list(X=xFromCol(covar,1:ncol(covar)),Y=yFromRow(covar,1:nrow(covar))))
6  x <- as.data.frame(getValues(covar))
7  x <- cbind(x,XY)
8  anyna <- apply(x[,c("alf", "pente")],1,function(x)any(is.na(x)))
9  setwd(path_temp)
10 save(x,file="input_sim.Rdata") #/ on sauvegarde la base de donnees prete pour l'analyse spatiale
11 setwd(wd)
12

```

Le script 'localisation_pred.R' prépare sous forme de matrice 3D la localisation des prédictions avec en X et Y le nombre de rangs et de colonnes des cartes de références (covariables) et en Z les valeurs des covariables qui se succèdent. Cette matrice est stockée temporairement dans le répertoire 'temp' (imput_sim.Rdata'). Le script est appelé en l. 47 du script principal.



```

1  ### 'ajustement_modeles.R' v2.0 - Decembre 2018
2  ### Auteure: Caroline CHARTIN - UCLouvain
3
4  ##-----
5  ## ajustement d'un modele par occupation de sols et application a toute la wallonie (raster temporaires)
6  ##-----
7
8  # Appel de la base de donnees creee par le script 'prepa_BDD_COT.R
9  setwd(path_temp)
10 load(file=paste0("db_",periode,".Rdata"))
11 db = as.data.frame(db)
12 setwd(wd)
13
14 # LANCEMENT D'UNE BOUCLE (par occupation de sols d'interet, i.e. OSI) pour la calibration et validation des
15 foreach (i = OSI, .combine = rbind)%do%{
16
17   # FIN DE LA BOUCLE
18
19   ## les rasters ont ete predits sur toute la surface de la wallonie pour laquelle nous avons les covariables.
20   ## Dans le script suivant, on va masquer les rasters selon les différentes occupations de sol, et les combin

```

Le script 'ajustement_modeles.R' permet la calibration, validation et application des modèles (un par occupation de sol) sur toute la Wallonie. La base de données est appelée (l.9-12 ici) et lancée dans une boucle (l.15-142 ; ici non développée car trop longue – si besoin, consulter directement le fichier). Cette boucle va traiter successivement les données de Culture puis de Prairie et créer des prédictions pour chaque occupation sur toute la Wallonie (fichiers temporaires dans 'temp'). Des graphiques résumant la calibration et validation des modèles sont créés et stockés dans le répertoire '3_PRODUITS' (Fig. 11). Le script est appelé en l. 49 du script principal.

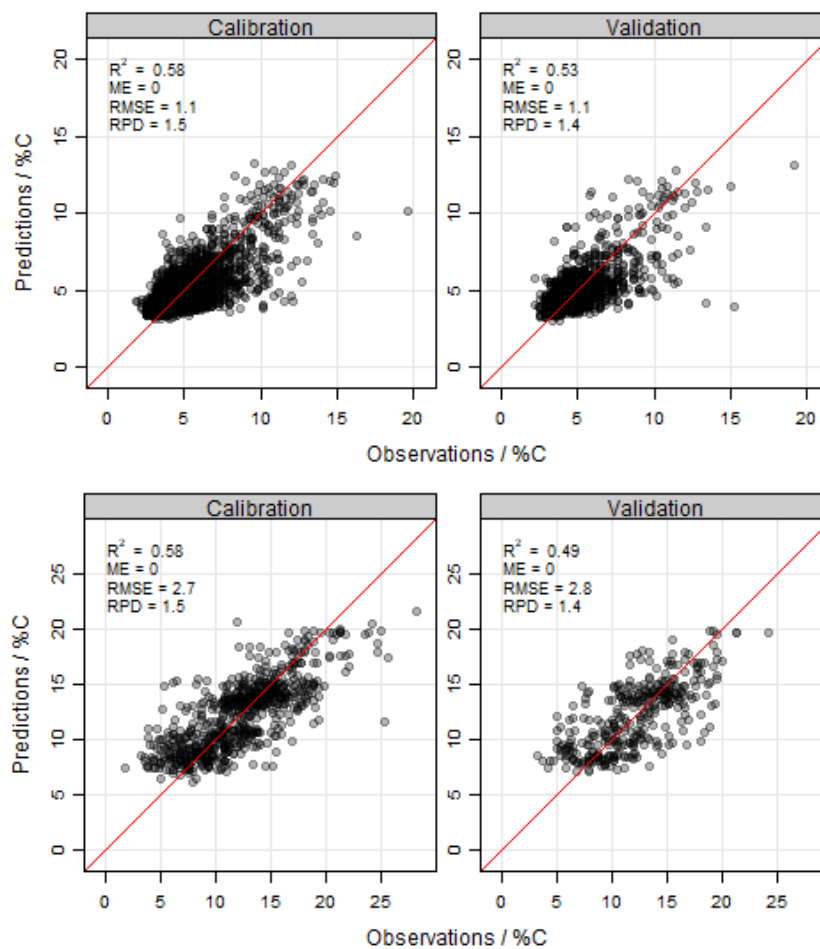


Figure 11 : Graphiques synthétiques des résultats de calibration et de validation des GAM produits par le script 'ajustement_modeles.R. (haut : Culture ; bas : Prairie ; valeurs de COT non réelles)

```

1  ### 'prod_rasters.R' v1.0 - Decembre 2018
2  ### Auteure: Caroline CHARTIN - UCLouvain
3
4  #-----
5  # Finalisation des fichiers de sorties
6  #-----
7
8  ## creation de la couche qui permettra de masquer selon l'occupation de sols
9  mask <- raster(paste0(path_SRC, "/COVAR_90m/occ_sol.txt"))
10 r <- ratify(mask)
11 rat <- levels(r)[[1]] # raster attributes
12 rat$name <- c("Culture", "Prairie", "Forêt", "Autres")
13 levels(r) <- rat
14
15 setwd(paste0(WD, "/temp"))
16 writeRaster(r, "lu.grd", overwrite=T)
17
18 ## application des masques sur les couches creees dans le script 'ajustement_modeles.R'
19 foreach(i = OSI)%do{%
20   r <- paste0("gam_", i, "_", periode, ".grd")
21   r2 <- paste0("gam_", i, "_", periode, "sub.grd")
22   LU <- raster("lu.grd")
23   tab <- levels(LU)[[1]]
24   rn <- row.names(subset(tab, tab$name==i))
25   val <- tab[rn,1]
26   LU[LU!=val] <- 0; LU[LU==val] <- 1
27   tmp_mask <- stack(r)*LU
28   writeRaster(tmp_mask, r2, overwrite=T)
29 }
30
31 ## combinaison des preditions sous la forme d'uniques rasters (COT, ES, er. relative) au format geoTiff
32 lsub <- list.files(path=paste0(WD, "/temp"), pattern=paste0(periode, "sub.grd$"))
33 r <- stack(lsub)
34 foreach(i = 1:3)%do{%
35   type <- c("COT", "erreur_standard", "erreur_standard_relative") [i]
36   stack_tmp <- stack(subset(r, i) + subset(r, i+3))
37   stack_tmp[stack_tmp==0] <- NA
38   names(stack_tmp) <- type
39   writeRaster(stack_tmp, filename = paste0(path_PROD, "/", type, "_", periode, ".tif"), overwrite=T)
40 }
41 setwd(WD)
42

```

Le script 'prod_rasters.R' va combiner les prédictions créées dans le script précédent pour chacune des occupation de sols 'Culture' et 'Prairie' (stockées temporairement dans 'temp'). Il va utiliser la couche spatialisée d'occupation de sol pour créer des masques et permettre de conserver pour chaque occupation de sol les prédictions associées et de masquer en blanc les zones où on ne trouve ni 'Culture', ni 'Prairie', et tout combiner. Les couches finales de prédictions, i.e. COT, erreurs standards de prédictions et les erreurs relatives, sont enregistrées sous le format requis geoTiff dans le répertoire '3_PRODUITS'. Ce script est appelé en l. 53 du script principal.

```

1  ### 'prod_cartes_logos.R' v2.0 - Decembre 2018
2  ### Auteure: Caroline CHARTIN - UCLouvain
3
4  #-----
5  # Edition de documents sous format .png
6  #-----
7
8  ## ces documents permettent un visionnage rapide des résultats. Vous pouvez ensuite les utiliser tels quels
9  ## OU exporter les cartes .tiff créées ci-dessus dans le SIG de votre choix
10
11 # les infos concernant la couverture spatiale et les échelles de couleur utilisées dans les documents
12 mylayout <- latticeExtra::layer({SpatialPolygonsRescale(layout.north.arrow(),offset = c(292500,155000),scale=
13   latticeExtra::layer({SpatialPolygonsRescale(layout.scale.bar(),offset = c(45000,20000),scale = 50000, fill=
14   latticeExtra::layer({sp.text(loc=c(45000,27500),"0",cex=0.8)}) +
15   latticeExtra::layer({sp.text(loc=c(95000,27500),"50 km", cex=0.8)})})
16
17 COT_colr <- colorRampPalette(brewer.pal(9, 'YlOrBr'))
18 COT_err <- colorRampPalette(rev(brewer.pal(9, 'RdBu'))))
19
20 # les logos qui seront integres dans les documents
21 require('png')
22 img1 <- readPNG(source=paste0(path_SRC,"/logos/logo_REQUASUD.png"))
23 img2 <- readPNG(source=paste0(path_SRC,"/logos/logo_licence.png"))
24 g1 <- rasterGrob(img1, interpolate=F)
25 g2 <- rasterGrob(img2, interpolate=T)
26
27 # la taille de la case pour les logos
28 size <- unit(1, "cm")
29 setwd(path_PROD)
30
31 # LANCEMENT D'UNE BOUCLE pour creer successivement un doc .png pour chacune des sorties 'COT', 'erreur standa
32 up <- function(x) quantile(x,0.995)
33 foreach (i = 1:3, .combine = rbind)%do%{
34   setwd(wd)
35 }

```

Le script '*prod_cartes_logos.R*' permet de créer rapidement des documents au format .png afin d'avoir une première visualisation des résultats de spatialisation, i.e. figures créées à partir des fichiers .tif créés dans le script précédent (fig. 12 et 13). Ce script est appelé en ligne 54 du script principal.

Carbone Organique des Sols sous cultures et prairies - 2012_2013

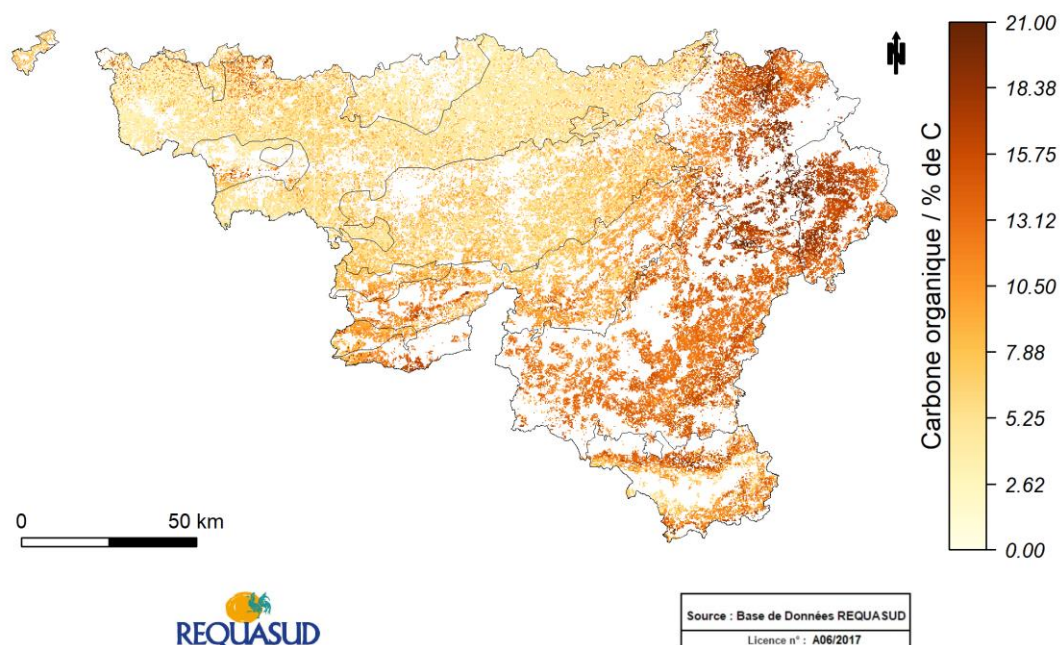


Figure 12 : document au format .png créé par le script 'prod_carte_logos.R' dans le cadre de l'exemple traité dans ce document. Ici, la prédiction des teneurs en COT. (valeurs non réelles)

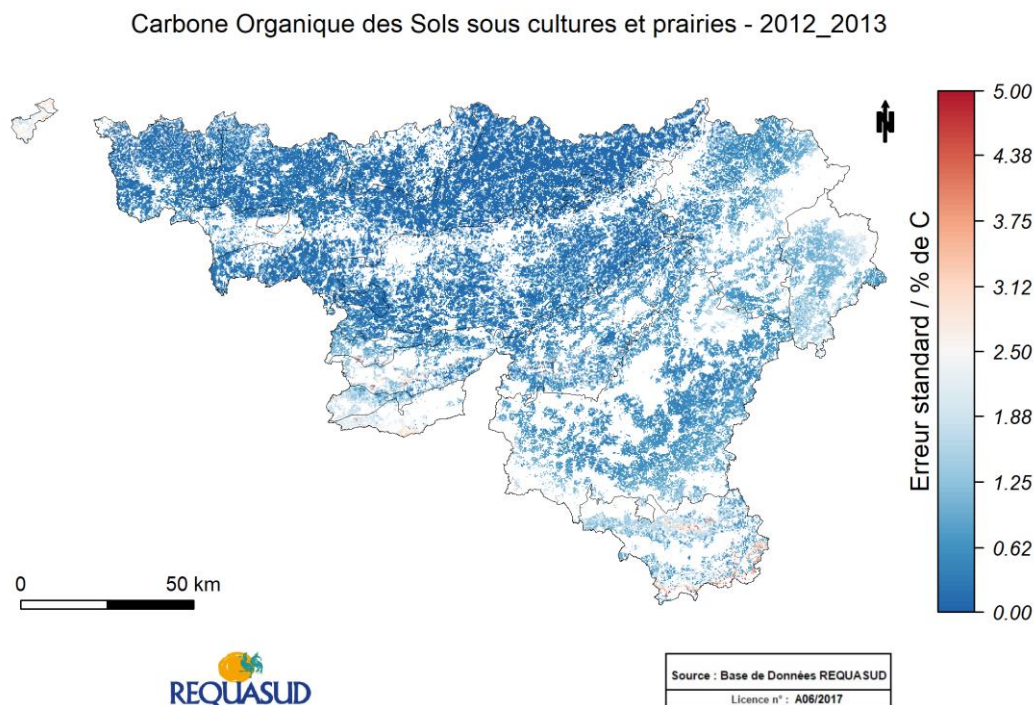


Figure 13: document au format .png créé par le script 'prod_carte_logos.R' dans le cadre de l'exemple traité dans ce document. Ici, les erreurs standard de prédiction des teneurs en COT. (valeurs non réelles)

```

1  ### 'metadata_COT.R' v2.0 - Mars 2019
2  ### Auteurs: Caroline CHARTIN - UCLouvain
3
4  # Création d'un fichier texte regroupant les infos nécessaires à la mise à jour des fiches de métadonnées de METAWAL
5  sink(paste0(path_PROD, "/metadata_COT_", periode, ".txt"))
6
7  cat("Elements de metadonnees pour la mise à jour dans METAWAL des fiches relatives aux cartes de la serie CARBIOSOL\n")
8  cat("des teneurs en COT (Carbone organique total) des sols agricoles wallons - cultures et prairies\n")
9  cat("-----\n")
10 cat("Noms des couches fournies (geoTiff) et correspondances dans METAWAL\n")
11 cat(paste0("COT_", periode, ".tif = CARBIOSOL - Teneurs predites en Carbone organique total - periode ", periode, "\n"))
12 cat(paste0("erreur_standard_", periode, ".tif : ATTENTION, non publiée dans le géoportail mais fournie pour information complémentaire\n"))
13 cat(paste0("erreur_standard_relative_", periode, ".tif = CARBIOSOL - Incertitudes des Teneurs en Carbone organique total - periode ", periode, "\n"))
14 cat("-----\n")
15 cat("Dates de reference\n")
16 cat("debut = ", deb_per, "\n")
17 cat("fin = ", fin_per, "\n")
18 cat("-----\n")
19 cat("Système de référence : LAMBERT72\n")
20 cat("Type de représentation spatiale : données raster\n")
21 cat("-----\n")
22 cat("Données d'entrées issues de REQUASUD\n")
23 cat("Licence REQUASUD : ", licence_RQS, "\n")
24 cat("-----\n")
25 cat("Covariables significatives sélectionnées dans le processus de modélisation pour les sols sous...\n")
26 cat("Cultures* : ", readRDS(paste0(path_temp, "/covar_culture_", periode, ".txt")), "\n")
27 cat("Prairies* : ", readRDS(paste0(path_temp, "/covar_prairie_", periode, ".txt")), "\n")
28 cat("se référer au Tableau 2 du Guide d'utilisation des scripts\n")
29
30 # fin de l'écriture
31 sink()
32

```

Pour terminer, le script '**metadata_COT.R**' permet de générer un fichier .txt résumant les éléments nécessaires à la mise à jour des fiches de métadonnées des cartes sur METAWAL (Fig. 14)

```

metadata_COT_2012_2013 - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
Elements de metadonnees pour la mise à jour dans METAWAL des fiches relatives aux cartes de la serie CARBIOSOL
des teneurs en COT (Carbone organique total) des sols agricoles wallons - cultures et prairies
-----
Noms des couches fournies (geoTiff) et correspondances dans METAWAL
COT_2012_2013.tif = CARBIOSOL - Teneurs predites en Carbone organique total - période 2012_2013
erreur_standard_2012_2013.tif : ATTENTION, non publiée dans le Géoportail mais fournie pour information complémentaire
erreur_standard_relative_2012_2013.tif = CARBIOSOL - Incertitudes des Teneurs en Carbone organique total - période 2012_2013
-----
Dates de reference
debut = 2012
fin = 2013
-----
Système de référence : LAMBERT72
Type de représentation spatiale : données raster
-----
Données d'entrées issues de REQUASUD
licence REQUASUD : A06/2017
-----
Covariables significatives sélectionnées dans le processus de modélisation pour les sols sous...
Cultures* : alf alti arg c_fact c_input lg_flux precip temp
Prairies* : alf alti arg c_input lg_flux precip temp
* se référer au Tableau 2 du Guide d'utilisation des scripts

```

Figure 14. Exemple de fichier texte renseignant pour la mise à jour des fiches de métadonnées de METAWAL.

----- FIN -----

Références

- Boer E.P.J., de Beurs K.M., Dewi Hartkamp A., 2001. Kriging and thin plate splines for mapping climate variables. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 3(2), 146-154.
- 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., Krüger, I., Carnol, M., van Wesemael, B., 2017. Mapping Soil Organic Carbon stocks and estimating uncertainties at the regional scale following a legacy sampling strategy (Southern Belgium, Wallonia). *Geoderma Reg.* 9, 73–86.
- DGO3, 2017. Rapport sur l'état de l'environnement Wallon 2017.
- ESRI 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Goidts, E., 2009. Soil organic carbon evolution at the regional scale: Overcoming uncertainties & quantifying driving forces. PhD Thesis, Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Belgium, 257p.
- Hassink J., 1997. The capacity of soil to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil* 191, 77-87.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. Additive models, trees, and related methods. In *The Elements of Statistical Learning*, Springer Series in Statistics, pages 295-336. Springer New York, January 2009.
- Jenness, J., 2006. Topographic Position Index (tpi_jen. avx) extension for ArcView 3. x, v. 1.3 a. Jenness Enterprises.
- Jenny H., 1941. Factors of soil formation. Mac Graw hill C, New York, 281 p.
- 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.
- Lagacherie P. , Arrouays D., Walter C., 2013. Cartographie numérique des sols : principe, mise en œuvre et potentialités. *Etude et Gestion des Sols* 20 (1), 83-98.
- 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
- Maugnard, A., Biélders, C., Bock, L., Colinet, G., Cordonnier, H., Degré, A., Demaarcin, 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.
- Minasny, B. & McBratney, A.B. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & Geosciences*, 32, 1378–1388.
- Pebesma, Edzer J., 2006. The Role of External Variables and GIS Databases in Geostatistical Analysis. *Transactions in GIS* 10 (4), 615–632.
- Phillips, J. D. 1990. A saturation-based model of relative wetness for wetland identification. *Water Resources Bulletin* 26, 333-342.

R Development Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

RStudio Team (2015). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.

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.

Trevor, H. and Tibshirani, R., 1986. Generalized additive models. Statistical science 1(3), 297-310.

Zar, J. H. Biostatistical Analysis. Prentice Hall, New Jersey, 1999.

ANNEXE 7 :

Article dans un journal scientifique : le data-paper

Soumis le 22/02/2019 dans Ecology

TITLE :

CARBIOSOL: Biological indicators of soil quality and organic carbon in grasslands and croplands in Wallonia, Belgium

AUTHORS :

Quentin VINCENT^{1*}, Caroline CHARTIN², Inken KRÜGER^{1§}, Bas VAN WESEMAEL², Monique CARNOL^{1*}.

¹ Laboratory of Plant and Microbial Ecology, InBioS, University of Liège, Botany Bât. 22, Chemin de la Vallée 4, 4000 Liège, Belgium

² Université Catholique de Louvain, Georges Lemaître Centre for Earth and Climate Research-Earth and Life Institute, Place Louis Pasteur 3, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium

[§]Current address : Thünen Institute, Institute of Forest Ecosystems, Alfred-Möller-Straße 1, Haus 41/42, 16225 Eberswalde

*Corresponding author: Quentin Vincent, Laboratory of Plant and Microbial Ecology, InBioS, University of Liège, Botany Bât. 22, Chemin de la Vallée 4, 4000 Liège, Belgium; quentin.vincent@uliege.be

ABSTRACT:

The protection of agricultural soil quality is critical to environmental sustainability and requires relevant indicators. Total soil organic carbon (SOC) is of importance for soil quality but its slow dynamic and inherent variability do not allow early detection of changes. The project CARBIOSOL provides a dataset from agricultural soils in Wallonia (Southern Belgium), of total SOC, SOC fractions and biological indicators, selected for their relevance as indicators of soil quality. Two land-uses (sampled in 2013), 10 landscape units (2015), seasonal variability in croplands (2016) and four management types (2017) were studied. Soil organic carbon content (total, stable fine fraction <20 µm, labile coarse fraction >20 µm), cold and hot water extractable carbon and nitrogen contents, total nitrogen, pH_{KCl}, pH_{H2O}, potential respiration, microbial biomass carbon and nitrogen, net nitrogen mineralisation, metabolic potential of soil bacteria, earthworm density and biomass, and two eco-physiological quotients (metabolic and microbial quotient) were measured for a total of 415 samples. The present dataset provides an important contribution for establishing a reference system of soil quality in Wallonia and eventually for large-scale studies through its integration into a global database. Moreover, the present dataset could be used to support the interpretation of measurements of fractions of SOC and biological indicators by soil analyses laboratories, which will be useful for farmers and decision makers to evaluate the effect of different management practices.

Keywords:

Database, Biological indicators, Carbon fractions, Soil quality, Agricultural soil, Soil Monitoring Network, Wallonia, Cropland, Grassland, Soil Microbial Biomass, Soil Organic Matter.

ANNEXE 8 : Data-mapping

CARBIOSOL			DATA PAPER			REFERENTIEL		
Variable	Description de la variable	Unité	Variable	Description of variable	Unity	Variable	Description de la variable	Unité
ID_SUBVENTION	Identifiant de la subvention	/	Project	project	/			
carbioso1_1	1ere année du projet		carbioso1_1	first year of the project				
carbioso1_2	2ème année du projet		carbioso1_2	second year of the project				
carbioso1_3	3ème année du projet		carbioso1_3	third year of the project				
carbioso1_4	4ème année du projet		carbioso1_4	fourth year of the project				
ID_ECHANTILLON	identifiant numérique unique de l'échantillon	/	ID_sample	sample identifier	/	sol_analyse	identifiant numérique unique de l'échantillon, à	/
NOM_ECHANTILLON	nom de l'échantillon utilisé lors des campagnes d'échantillonnage							
						sol_cp	code postal du lieu de prélèvement	/
						sol_geoid	issu de REQUACARTO	/
						sol_date	période d'échantillonnage	/
PERIODE_ECHANTILLON	période d'échantillonnage	/	Period_sampling	period of sampling	/			
oct-13	octobre 2013		october-13	October 2013		01/10/2013	octobre-13	
nov-13	novembre 2013		november-13	November 2013		01/11/2013	novembre-13	
mars-14	mars 2014		march-14	March 2014		01/03/2014	mars-14	
avr-14	avril 2014		april-14	April 2014		01/04/2014	avril-14	
mai-14	mai 2014		may-14	May 2014		01/05/2014	mai-14	
avr-15	avril 2015		april-15	April 2015		01/04/2015	avril-15	
mai-15	mai 2015		may-15	May 2015		01/05/2015	mai-15	
juin-15	juin 2015		june-15	June 2015		01/06/2015	juin-15	
avr-16	avril 2016		april-16	April 2016		01/04/2016	avril-16	
juin-16	juin 2016		june-16	June 2016		01/06/2016	juin-16	
août-16	août 2016		august-16	August 2016		01/08/2016	août-16	
oct-16	octobre 2016		october-16	October 2016		01/10/2016	octobre-16	
nov-16	novembre 2016		november-16	November 2016		01/11/2016	novembre-16	
juin-17	juin 2016		june-17	June 2017		01/06/2017	juin-17	
ANNEE_ECHANTILLON	année de l'échantillonnage	/	Year_sampling	year of sampling	/			
2013	2013		2013	2013				
2015	2015		2015	2015				
2016	2016		2016	2016				
2017	2017		2017	2017				
COORDONNEE_X	longitude en projection lambert 72					sol_x	longitude en projection lambert 72	m
COORDONNEE_Y	latitude en projection lambert 72					sol_y	latitude en projection lambert 72	m
ID_SITE	identifiant du site	/	ID_site	site identification	/			
REPETITION	numéro de la répétition	/	Replicate	replicate number	/			
REGION_AGRICOLE	régions agricoles wallonnes, définies selon leurs caractéristiques naturelles et de leur potentiel agro-économique ¹	/	Agricultural_region	Walloon agricultural regions, defined according to their natural characteristics and their agro-economic potential ¹	/			
ardenne	ardenne		ardenne	Ardenne				
condroz	condroz		condroz	Condroz				
famenne	famenne		famenne	Famenne				
haute-ardenne	haute ardenne		high-ardenne	High Ardenne				
jurassique	jurassique		jurassic	Jurassic				
limoneuse	limoneuse		loamy	Loamy				
region_herbagere	region herbagere		grassland	Grassland				
sablo-limoneuse	sablo-limoneuse		sandy-loamy	Sandy-loamy				
						sol1_code	texture observée sur le terrain	/
OCCUPATION	occupation du sol au moment du prélèvement	/	Land_use	land use type	/	sol2_code	occupation du sol au moment du prélèvement	/
culture	culture		cropland	cropland		110	Cultures en rotation	
prairie	prairie		grassland	grassland		120	Prairie permanente	
						130	Prairie temporaire	
EXPLOITATION	type d'exploitation des cultures (mode de gestion)	/	Land_management	land management	/	sol_bio	type d'exploitation des cultures (mode de gestion)	/
conventionnelle	conventionnelle		conventional	conventional farming		100	Conventionnelle	
biologique	biologique		organic	organic farming		200	Biologique	
conversion_biologique	conversion biologique		organic_transition	under transition to organic farming		300	En_conversion	
conservation	conservation		conservation	conservation agriculture		400	Conservation	
PRATIQUE_AGRICOLE	type de pratique agricole	/	Agricultural_practice	agricultural practice	/			
TCS	techniques culturales simplifiées		SNIT	shallow non-inversion tillage				
NL_LO	non labour, labour occasionnel		NT_OT	no-till, occasional tillage farming				
prairie_fauchee_temporaire	prairie fauchée temporaire		mowed_short-term_grassland	mowed short-term grassland				
prairie_fauchee_permanente	prairie fauchée permanente		mowed_long-term_grassland	mowed long-term grassland				
prairie_paturee	prairie pâturée		grazed_grassland	grazed grassland				
NA	information non disponible		NA	information not available				
						sol3_code_2	type de culture lors de la 2ème année avant le prélèvement	/
						sol3_code_1	type de culture lors de la 1ère année avant le prélèvement	/
						sol3_code_0	type de culture lors du prélèvement	/
CULTURE_PRELEVEMENT	type de culture lors du prélèvement	/	Crop	crop type at time of sampling	/			
betterave	betterave		beet	beetroot (Beta vulgaris)		430	Betterave sucrière	
mais	mais		corn	corn (Zea mays)		240	Mais fourrage	
luz-tref-fet	luzerne-trefle-fetouque		luc_clov_fesc	lucerne, clover and fescue (Medicago sativa, Trifolium sp. and Festuca sp.)		230	Mélange de graminées et légumineuses	
petit_pois	petit pois		pea	pea (Pisum sativum)		365	Pois	
potiron	potiron		pumpkin	pumpkin (Cucurbita maxima)		375	Potiron	
pomme_de_terre	pomme de terre		potato	potato (Solanum tuberosum)		350	Pomme de terre	
froment	froment		wheat	wheat (Triticum sp.)		101	Froment	
herbe	couvert naturelle		short-term_grassland	short-term grassland		495	Couverts naturels	
NA	information non disponible		NA	information not available		999	Indéterminé	
ANNEE_CONVERSION	année de conversion en agriculture biologique	/	Year_transition	year of transition to organic farming	/			

Subvention CARBIOSOL V – Rapport final

ANNEE_CONVERSION	année de conversion en agriculture biologique	/	Year_transition	year of transition to organic farming	/			
1991	1991		1991	1991				
2002	2002		2002	2002				
2009	2009		2009	2009				
2016	2016		2016	2016				
2017	2017		2017	2017				
NA	information non disponible		NA	information not available				
						sol_superficie	de la zone de prélèvement ou de la parcelle	ha
						sol_profondeur	profondeur d'échantillonnage pour le carbone et les autres analyses réalisées chez REQUASUD	cm
						sol_profondeur_IB	profondeur d'échantillonnage pour les indicateurs biologiques (détails dans le cavenas sur la BDD REFERENTIEL)	cm
						sol_profondeur_lombric	profondeur d'échantillonnage pour les lombrics	cm
PH_KCL	pH mesuré au KCl	/	pHkcl	pH measured in KCl	/			
PH_H2O	pH mesuré à l'eau	/	pHwater	pH measured in water	/			
C_ORGA	carbone organique total du sol	% d.w.	Corg	total soil organic carbon content ²	% d.w.	sol_carbone	carbone organique total du sol	% m.s.
C_ORGA_INF20	carbone dans la fraction inférieure à 20µm du sol	% d.w.	Corg_lwr20	organic carbon content in soil fraction lower	% d.w.	sol_carbone_inf20	carbone dans la fraction inférieure à 20µm du sol	% m.s.
C_ORGA_SUP20	carbone dans la fraction supérieure à 20µm du sol	% d.w.	Corg_abv20	Organic carbon content in soil fraction above 20µm	% d.w.	sol_carbone_sup20	carbone dans la fraction supérieure à 20µm du sol	% m.s.
C_EAU_FROIDE	carbone extrait à l'eau froide	mg C/kg	WSC	water soluble carbon, cold water extractable carbon (20°C)	mg C/kg	sol_c_eau_froide	carbone extrait à l'eau froide	mg C/kg
C_EAU_CHAUDE	carbone extrait à l'eau chaude	mg C/kg	HWC	hot water extractable carbon (80°C), "Labile carbon"	mg C/kg	sol_c_eau_chaude	carbone extrait à l'eau chaude	mg C/kg
N_EAU_FROIDE	azote extrait à l'eau froide	mg N/kg	WSN	water soluble nitrogen, cold water extractable	mg N/kg	sol_n_eau_froide	azote extrait à l'eau froide	mg N/kg
N_EAU_CHAUDE	azote extrait à l'eau chaude	mg N/kg	HWN	hot water extractable nitrogen (80°C)	mg N/kg	sol_n_eau_chaude	azote extrait à l'eau chaude	mg N/kg
N_TOTAL	azote total du sol	‰	Ntot	total soil nitrogen content	‰	sol_n_total	azote total du sol	‰
C_ORGA_N_TOTAL	ratio carbone organique/azote total	/	Corg_Ntot	ratio between soil organic carbon and nitrogen contents	/			
C_MIC	carbone dans la biomasse microbienne (carbone microbien, biomasse microbienne)	mg C/kg	MBC	microbial biomass carbon ²	mg C/kg	sol_c_mic	carbone dans la biomasse microbienne (carbone microbien, biomasse microbienne)	mg C/kg
N_MIC	azote dans la biomasse microbienne (azote microbien)	mg N/kg	MBN	microbial biomass nitrogen ²	mg N/kg	sol_n_mic	azote dans la biomasse microbienne (azote microbien)	mg N/kg
C_MIC_N_MIC	ratio carbone microbien/azote microbien	/	MBC_MBN	ratio between microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen content	/			
P_RESPIRATION	potentiel de respiration du sol	mg C-CO ₂ /(kg.h)	RP	respiration potential ⁴	mg C-CO ₂ /(kg.h)	sol_p_respiration	potentiel de respiration du sol	mg C-CO ₂ /(kg.h)
P_METABOLIQUE	potentiel métabolique microbien	mg/(kg.h)	MP	metabolic potential of soil bacteria ²	mg/(kg.h)	sol_p_metabolique	potentiel métabolique microbien	%
N_MINERALISATION	minéralisation nette de l'azote	mg N/(kg.j)	Nmin	net nitrogen mineralisation ³	mg N/(kg.j)	sol_n_mineralisation	minéralisation nette de l'azote	mg N/(kg.j)
Q_METABOLIQUE	quotient métabolique	%	qCO ₂	metabolic quotient=PR/MBC ³	%			
Q_MICROBIEN	quotient microbien	%	qmic	microbial quotient=MBN/Corg ²	%			
LOMBRIC_DENS	densité de lombrics	ind/m	EWD	earthworm density	ind/m	sol_lombric_dens	densité de lombrics	ind/m
LOMBRIC_MASS	masse de lombrics	g/m	EWM	earthworm mass	g/m	sol_lombric_mass	masse de lombrics	g/m ²

1 <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/PHYS%205.html>

2 Radcliffe S., Bosman B., Carnol M. (2018) Spatial and temporal variability of biological indicators of soil quality in two forest

3 Krüger I., Chartin C., van Wesemael B., Malchair S., Carnol M. (2017) Integrating biological indicators in a Soil Monitoring Network (SMN) to improve soil quality diagnosis – a case study in Southern Belgium (Wallonia). Biotechnol. Agron. Soc. Environ

4 Krüger I., Chartin C., van Wesemael B., Carnol M. (2018) Defining a reference system for biological indicators of agricultural soil quality in Wallonia, Belgium. Ecol. Indicator

ANNEXE 9 :

Prototype de bulletin d'analyse

[Prototype] Bulletin d'analyse des terres

Références et identification de la parcelle

Date de prélèvement :

N° du rapport :

Date de réception :

N° du préleveur :

Date du début
d'analyse :

N° du laboratoire :

Date d'envoi :

Parcelle :

Commune :

Région agricole :

Géo-Id :

Prof. Prélèvement :

Commentaire en lien avec le prélèvement :

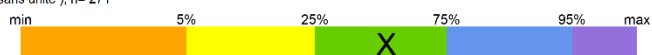
Echantillon n°328 dans la base de données CARBIOSOL

Résultats analytiques – Indicateurs physico-chimiques

pH

Valeur mesurée Interprétation

pH au KCl
(sans unité), n= 271

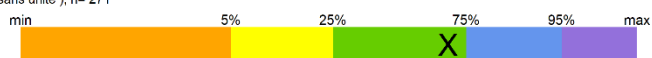


6,32

Satisfaisant

pH à l'eau

(sans unité), n= 271



7,43

Satisfaisant

Carbones

Carbone organique total

(% m.s.), n= 309



0,95

Faible. Un amendement en compost augmenterait la teneur en carbone organique.

Carbone organique des particules inférieures à 20µm

(mg C/kg), n= 171



0,50

Faible. **CONSEIL**

Carbone organique des particules supérieures à 20µm

(mg C/kg), n= 171

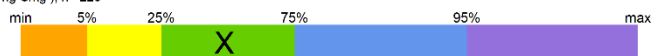


0,45

Faible. **CONSEIL**

Carbone organique extrait à l'eau froide

(mg C/kg), n= 229



61,1

Satisfaisant

Carbone organique extrait à l'eau chaude

(mg C/kg), n= 230



562,9

Satisfaisant

Azote

Azote extrait à l'eau froide

(mg N/kg), n= 230



15,4

Satisfaisant

Azote extrait à l'eau chaude

(mg N/kg), n= 230



66,1

Satisfaisant

Azote total

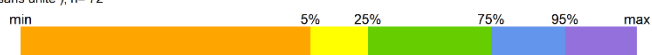
(‰), n= 72



Non analysé /

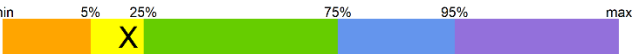
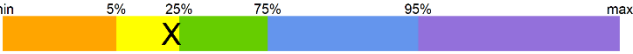
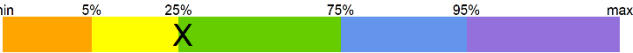
Rapport entre le C organique et le N total

(sans unité), n= 72



Non analysé /

Résultats analytiques – Indicateurs biologiques

	Valeur mesurée	Interprétation
Carbone microbien (mg C/kg), n= 271 	223	Faible. Un amendement en compost augmenterait la teneur en carbone organique.
Azote microbien (mg N/kg), n= 271 	39	Satisfaisant
Rapport entre C et N microbiens (sans unité), n= 271 	5,7	Faible. La communauté microbienne est dominée par des bactéries. L'azote ne semble donc pas être limité pour les micro-organismes.
Respiration potentielle (mg C-CO2/kg/h), n= 272 	0,23	Satisfaisant
Potentielle métabolique (%), n= 268 	58	Satisfaisant
Minéralisation nette de l'azote (mg N/kg/j), n= 271 	-0,05	Faible. L'azote est faiblement disponible pour la plante. L'apport d'amendements organiques d'origine végétale améliorera la minéralisation.
Quotient métabolique (%), n= 271 	1,05	Satisfaisant
Quotient microbien (%), n= 271 	2,35	Satisfaisant
Densité en lombric (%), n= 271 	0	Satisfaisant

Conseils

La matière organique et l'azote semblent être limités dans ce sol. L'azote du sol semble être majoritairement immobilisé dans les bactéries et se trouve peu accessible pour les plantes.

Un **amendement organique d'origine végétale** permettra à la fois d'augmenter le pool de carbone, de rétablir l'équilibre champignons/bactéries, et de libérer progressivement de l'azote disponible pour les plantes.

ANNEXE 10 :
Programme de la demi-journée
« Mesurer la qualité biologique des sols agricoles »
du 17/01/2019



MESURER LA QUALITE BIOLOGIQUE DES SOLS AGRICOLES - Le projet CARBIOSOL -

JEUDI 17 JANVIER A 14H
Bâtiment Francini du CRA-w,
146 chaussée de Namur, 5030 Gembloux

Présentations des résultats du projet CARBIOSOL
(financement SPW-DGO3)

PROGRAMME

- 14h00 – 14h15 : Accueil des participants**
- 14h15 – 14h30 : Introduction générale du projet CARBIOSOL**
(Esther Goidts – SPW-DGO3)
- 14h30 – 14h45 : Présentation des indicateurs biologiques**
(Quentin Vincent - ULiège) + discussion
- 14h45 – 15h00 : Présentation du carbone et de ses fractions**
(Caroline Chartin - UCLouvain) + discussion
- 15h00 – 15h15 : Collaboration et travaux du CRA-W**
(Bernard Godden et Brieux Hardy – CRA-w) + discussion
- 15h15 – 15h30 : Collaboration et travaux de REQUASUD**
(Clémence Mariage - ULiège/Gembloux AgrobioTech) + discussion
- 15h30 – 15h45 : Pause-café**
- 15h45 – 16h15 : Données et outils développés pour les acteurs**
(Caroline Chartin et Quentin Vincent) + discussion
- 16h15 – 16h45 : Discussion générale**
- 16h45 – 17h15 : Pot de l'amitié**



Contacts : caroline.chartin@uclouvain.be; quentin.vincent@uliege.be

Abstract

Development of indicators biological soil quality and soil organic carbon for the assessment of the state of soils in Wallonia: valuation of assets and transfer to users (CARBIOSOL 5)

Awareness on the magnitude of the effects of human activities on soils, a non-renewable resource at the human timescale, has led policy makers to develop tools for monitoring soil quality. It is in this context that the CARBIOSOL research project was initiated (July 2013 - January 2019, SPW-DGO3 funding). Four previous grants (CARBIOSOL 1 to 4, 2014, 2015, 2016 and 2017) resulted in measurements soil carbon fractions and biological indicators of soil quality in 415 samples under crops and grasslands. The general objective of this project was to value acquired data and experience by transferring tools (methodologies, databases, interpretation tools) to users (analytic laboratories, managers and farmers). Thirteen indicators of soil biological quality and two soil organic carbon (SOC) fractions were studied. An extended summary addresses the effects of land use (cropland and grassland) and land management (conventional, organic and conservation agriculture) on the indicators, their spatial and seasonal variability, correlations between the indicators, and methods of transfer transferred to users. Data acquired during all CARBIOSOL grants were compiled in a database (DB), called 'CARBIOSOL' (available on www.carbiosol.uliege.be).

Two additional DBs were developed for public soil analysis laboratories. The DB 'REFERENTIEL' is a formatted version of 'CARBIOSOL', allowing its integration into the centralised DB of the public laboratories and the addition of new values. The DB 'LIBRAIRIE SPECTRALE' contains values for SOC fractions and Near-Infra Red spectrometry. It is a calibration set for predicting SOC fractions based on NIR spectroscopy analysis of bulk soil.

A "Guide on biological indicators and organic carbon in agricultural soils in Wallonia" was written to inform the personnel of public laboratories on the importance of biological soil quality, the different indicators available, their reference values observed in Walloon soils, and guidelines for interpretation. Further, a detailed analytical protocol is included for each indicator. The guide also presents associated tools, such as the developed databases, cartographic tools and correlations between indicators. Examples of the use of the indicators are provided for different agricultural land management or practices.

This research was funded by the Public Administration of Wallonia (SPW-DGO3).

Caroline CHARTIN^{1*}, Quentin VINCENT^{2*}, Bas VAN WESEMAEL¹, Monique CARNOL²

¹ TECLIM – EARTH & LIFE INSTITUTE - ELIC, PLACE LOUIS PASTEUR, 1348 LOUVAIN-LA-NEUVE

² LABORATOIRE D'ÉCOLOGIE VÉGÉTALE ET MICROBIENNE, INBIOS, BOTANIQUE B22, CHEMIN DE LA VALLÉE 4, 4000 LIÈGE

*equivalent contribution