

Statut organique et potentiel de minéralisation du C et de l’N des sols d’un réseau de parcelles en agriculture biologique

Dossier de résultats

Remerciements et contributions à l'étude

Cette étude a été initiée et suivie par B. Godden dans le cadre de la convention BIO2020 avec l'aide de l'équipe technique composée de J. Frederick, F. Tasiaux et D. Verhulst. Les analyses ont été réalisées par V. Reuter, B. Malotiaux et V. Dethier du Laboratoire « sol » du CRA-W. L'analyse des résultats et la rédaction du rapport ont été réalisées par B. Hardy. La relecture du document a été effectuée par B. Godden, D. Stilmant et B. Huyghebaert.

Résumé

Au cours des années 2014 et 2015, la teneur en carbone organique total (COT), l'activité biologique globale et le potentiel de fourniture en N ont été déterminés pour les sols d'une quarantaine de parcelles dans un réseau de fermes en agriculture biologique (AB), en région wallonne. Le COT a été mesuré par la méthode de Walkley-Black et les taux de minéralisation du C et du N ont été suivis au cours d'une incubation de 28 jours à 28 °C, en laboratoire. L'objectif suivi était d'établir un référentiel pour l'AB en région wallonne pour les variables d'intérêt. Les résultats obtenus ont été comparés aux tendances régionales et ont été analysés selon l'antécédent cultural, le temps de conversion des parcelles vers l'AB, le type de ferme (maraîchage, grandes cultures sans élevage, polyculture-élevage et herbagère), la classe texturale du sol et par région agricole.

De l'analyse des chiffres, il ressort que le statut organique des parcelles en AB est supérieur aux valeurs médianes des régions agricoles dans environ 60 % des cas, et qu'il est plus fréquent d'observer des teneurs élevées en COT pour les parcelles les plus anciennement converties à l'AB. Les parcelles des fermes herbagères et de polyculture-élevage tendent à avoir un meilleur statut organique que les parcelles des autres types d'exploitation, ce qui pourrait être le reflet d'un meilleur accès aux engrais de ferme ou de l'influence positive de la prairie sur le statut organique des sols. Néanmoins, les différences observées entre les types d'exploitations ne sont pas significatives statistiquement. L'hétérogénéité des résultats au sein d'un type d'exploitation souligne que les teneurs en matière organique des sols dépendent de nombreux facteurs, tant au niveau du mode de gestion (historique cultural, rotation, pratiques agricoles,...) que de l'environnement de la parcelle (type de sol, climat,...). Outre l'augmentation de l'application de matières organiques exogènes, l'allongement des rotations, la diversification des cultures et l'augmentation des restitutions (restitution des pailles, cultures intermédiaires) sont connues pour améliorer le statut organique des sols et font partie des pratiques souvent observées chez les agriculteurs en AB.

De manière générale, les taux de minéralisation du C et du N des sols augmentent avec les teneurs en COT, ce qui souligne l'importance du statut organique du sol pour maintenir une bonne activité biologique et promouvoir la fourniture naturelle en N du sol par les processus d'ammonification et de nitrification. Le taux de minéralisation par unité de COT tend toutefois à décroître avec les teneurs en matière organique. Les sols de textures sablo-limoneuse et limono-sableuse possèdent des taux de minéralisation par unité de COT supérieurs à la moyenne, ce qui suggère que la fraction fine (argiles, limons fins) joue un rôle important dans la stabilisation des matières organiques du sol par associations organo-minérales. L'effet de l'antécédent cultural sur la fourniture en azote a également été mis en évidence. Pour les céréales de printemps, nous avons mesuré une fourniture en N de l'ordre de 18 % inférieure par rapport à une céréale d'hiver. Au contraire, la fourniture d'N est augmentée d'environ 15 % après un mélange céréale-légumineuse et d'environ 22 % après une culture de légumineuse pure par rapport à une céréale d'hiver.

pure. Pour l'ensemble de nos données, nous obtenons un rapport C/N d'environ 16.5 pour la fraction minéralisée.

Concernant la fourniture en N du sol, les taux de minéralisation en N des parcelles en AB ont été comparés aux taux de minéralisation en N d'une sélection de parcelles de la convention CARBIOSOL. Cette comparaison n'a mis en avant aucune différence de potentiel de fourniture en N des sols en AB par rapport aux sols en agriculture conventionnelle. Ce résultat n'est pas étonnant puisque (1) les processus de respiration hétérotrophe et d'ammonification-nitrification représentent la base du fonctionnement des microorganismes du sol et (2) les valeurs obtenues dans les deux conditions ne reflètent pas exactement les mêmes contextes pédologiques et culturels, ce qui accroît la variabilité des résultats et limite la sensibilité de l'analyse.

Afin d'aller plus loin dans l'évaluation de l'influence de l'AB sur la fertilité biologique des sols, il serait intéressant d'évaluer la performance des parcelles du réseau de fermes pour d'autres indicateurs d'abondance et surtout de la diversité de la micro- et de la macrofaune qui peut être corrélée à l'efficacité d'utilisation des ressources nutritives ainsi qu'à la résilience du système face à certains pathogènes des cultures.

Contexte et objectifs

L'abolition des produits phytopharmaceutiques et engrais de synthèse représente la principale différence entre l'agriculture biologique (AB) et l'agriculture conventionnelle. Ces restrictions impliquent une gestion différenciée de la fertilité et de la lutte contre les adventices et les ravageurs des cultures qui se traduit généralement par des successions culturales et des itinéraires techniques adaptés et une fertilisation essentiellement organique. Ces modifications de pratiques sont susceptibles d'influencer les teneurs en matière organique ainsi que le fonctionnement biologique des sols agricoles. L'augmentation des restitutions et l'inclusion de légumineuses dans les rotations font partie des leviers permettant d'augmenter les teneurs en matière organique du sol et de compléter les engrais de ferme et autres engrais organiques pour assurer à la culture une fourniture en azote (N) suffisante (Kukreja and Meredith, 2011). Ces modifications systémiques sont susceptibles d'influencer la (micro-)biologie des sols, tant en termes d'abondance que d'activité et de diversité (Araújo et al., 2009; Fließbach et al., 2007; Lori et al., 2017; Mäder et al., 2002).

La mesure du taux d'émission de CO₂ du sol est l'un des indicateurs les plus fréquemment utilisés pour appréhender l'activité biologique du sol. Dans un environnement dépourvu de carbonates, ces émissions sont dues à la respiration hétérotrophe (décomposition de la matière organique du sol par la micro- et la macro-faune, en conditions aérobies) et à la respiration autotrophe (respiration racinaire et mycorhizienne) du sol (Buisson et Aubinet, 2010). Le taux de respiration du sol dépend du statut organique du sol, de la quantité, la qualité et la temporalité des restitutions, des propriétés intrinsèques du sol (granulométrie) ainsi que de facteurs extérieurs tels que les conditions climatiques (température, humidité) et l'action anthropique, qui peut par exemple influencer les conditions d'aération (macroporosité, tassement) et l'état structural par les opérations de travail du sol.

Au cours de deux années consécutives, la teneur en matière organique, l'activité biologique globale et le potentiel de fourniture en N ont été déterminés pour une quarantaine de parcelles dans un réseau de fermes en agriculture biologique, en région wallonne. L'objectif suivi était d'établir un référentiel pour l'AB en région wallonne pour les variables d'intérêt. Les résultats obtenus ont été comparés aux tendances régionales et ont été analysés selon l'antécédent culturel, le temps de conversion des parcelles vers l'AB et le type de ferme, la classe texturale du sol et la région agricole.

Matériel et méthodes

Sites d'étude

Quarante-deux parcelles en AB ont été sélectionnées sur l'ensemble du territoire wallon (Figure 1). Pour chacune d'entre-elles, un échantillon composite d'une quinzaine de prises a été prélevé dans la couche de labour (0-30 cm) en décembre 2014 et en octobre-novembre 2015. Le sol a été tamisé en frais à 5 mm et homogénéisé.

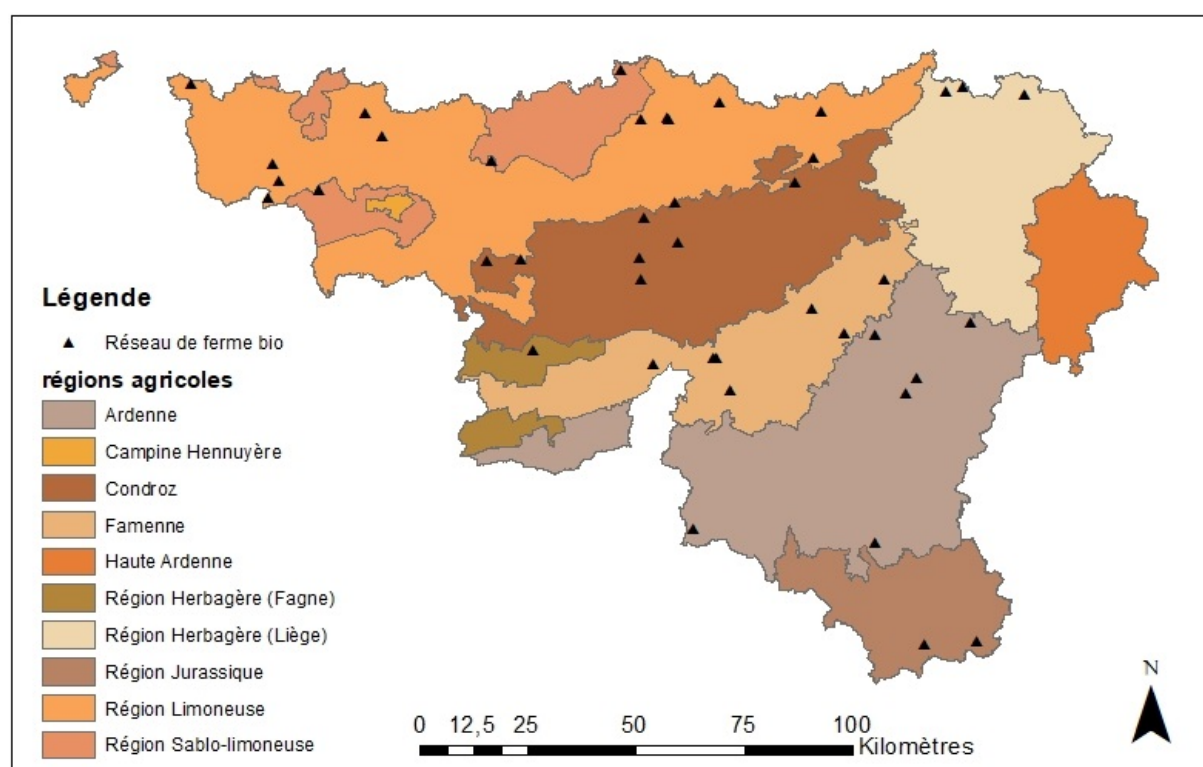


Figure 1. Localisation des parcelles échantillonnées sur la carte des régions agricoles

Analyses

Carbone organique total (COT)

Après homogénéisation, un aliquote de chaque échantillon a été séché à l'air libre jusqu'à poids constant et tamisé à 2 mm. Le cas échéant, le refus a été pesé et rapporté à la masse de sol initiale pour déterminer la charge caillouteuse. La teneur en carbone organique total (COT) a été déterminée sur environ 1g de sol < 2 mm par la méthode de Walkley et Black (Walkley and Black, 1934). Cette méthode consiste à oxyder le carbone organique à l'aide d'une quantité connue de dichromate de K en excès, en présence d'acide sulfurique concentré. L'excès de dichromate est alors titré en retour avec du sulfate ferreux afin de déterminer la quantité de dichromate, et donc de carbone, ayant réagi. Pour le calcul de la teneur en COT, on considère que le carbone organique possède en moyenne un étage d'oxydation de zéro. Un coefficient correctif de 1.33 a été appliqué à la valeur calculée pour compenser le caractère incomplet de la réaction.

Minéralisation potentielle du C et du N

Les sols frais tamisés à 5 mm ont été incubés en condition aérobie à 28 °C pendant 28 jours selon la norme XP U 44-163. Afin de déterminer le potentiel de minéralisation d'N du sol, les contenus en nitrate et ammonium ont été déterminés avant l'incubation et après 28 jours. Afin d'évaluer l'activité biologique globale du sol (respiration), les émissions de CO₂ ont été mesurées après 7, 14, 21 et 28 jours par piégeage du CO₂ à l'aide d'une quantité connue d'hydroxyde de sodium (NaOH) 0.5 M, l'incubation ayant lieu dans un récipient hermétiquement fermé. Le dosage a été réalisé par titrage en retour avec de l'HCl 0.1 M.

Validation des données

Afin de vérifier la cohérence des données, nous avons comparé les variables d'intérêt parcelle par parcelle entre les deux années de prélèvement, sous l'hypothèse que les chiffres suivent la même tendance générale d'une année à l'autre.

Analyse des données

Les parcelles ont été localisées dans un système d'information géographique afin d'extraire l'information utile de différentes couches de données régionales telles que la carte des régions agricoles, la carte numérique des sols de Wallonie (CNSW) et les cultures principales (SIGEC) pour les deux années d'études. L'effet des variables qualitatives pertinentes (classe texturale, type de ferme, région agricole, antécédent cultural) sur les teneurs en COT et les données de minéralisation du C et du N des sols ont été testées par analyse normale de la variance (ANOVA) suivie d'un test post-hoc de Newman-Keuls (comparaison multiple des moyennes) à l'aide du logiciel R, version 3.4.2.

Comparaison aux tendances régionales

Afin d'évaluer si la conversion vers l'AB entraîne un effet sur les teneurs en COT des sols agricoles, les valeurs des prélèvements de 2014 et 2015 dans les sols du réseau de fermes en AB ont été comparées aux valeurs médiane et moyenne des régions agricoles de Wallonie, calculées à partir de la base de données REQUASUD¹. La base de données REQUASUD accumule plusieurs milliers d'analyses de COT chaque année (autour de 12 000 analyses par an, en grandes cultures, pour les années 2014 et 2015). Concernant la fourniture potentielle en N, les résultats obtenus pour les sols du réseau de fermes en AB ont été comparés à la base de données CARBIOSOL, prise comme référence pour l'agriculture conventionnelle en région wallonne (Chartin et al., 2019; Vincent et al., 2019). Afin de pouvoir comparer les deux jeux de données sur des bases objectives, la base de données CARBIOSOL a d'abord été filtrée afin de ne conserver que les prélèvements ayant eu lieu entre octobre et décembre, la date de prélèvement ayant une influence majeure sur les résultats. Soixante-cinq sols de parcelles gérées en agriculture conventionnelle ont ainsi été sélectionnés, localisés en régions limoneuse et sablo-limoneuse. Les principaux antécédents culturaux de ces parcelles étaient des céréales d'hiver, des betteraves sucrières, des pommes de terre, du maïs ensilage et des pois de conserverie. Ils ont été comparés aux 29 sols du réseau de ferme en AB localisés en régions limoneuse et sablo-limoneuse. Les sols de la base de données CARBIOSOL ayant été incubés à 25 °C plutôt qu'à 28 °C, les résultats ont été transformés à l'aide de la

¹ http://www.requaconsult.be/requaconsult_sol

fonction suivante, qui considère que la vitesse de nitrification augmente de manière exponentielle avec la température (COMIFER, 2013) :

$$N_{28} = N_{25} * e^{0.115(28-25)}$$

Avec N_{28} , la quantité d'N journalière minéralisée à 28 °C et N_{25} la quantité d'N journalière minéralisée à 25 °C. D'après cette relation, un incrément de 3 °C de la température d'incubation revient à accélérer la réaction d'un facteur 1.41.

Résultats et discussion

Description des parcelles

Les 42 parcelles couvrent l'ensemble des régions agricoles de Wallonie, à l'exception de la Campine hennuyère et de la haute Ardenne (Figure 1). La région limoneuse est la plus représentée avec 14 parcelles, suivie par la région Famenne et Fagnes (8 parcelles), le Condroz (7 parcelles) et l'Ardenne (6 parcelles). Les régions herbagères (3 parcelles), sablo-limoneuse (2 parcelles) et jurassique (2 parcelles) sont moins bien représentées. Selon la carte numérique des sols de Wallonie (CNSW), la majorité des sols des parcelles cultivées sont de texture limoneuse (21 parcelles) ou limono-caillouteuse (17 parcelles). Les sols ardennais sont exclusivement limono-caillouteux (6 parcelles) tout comme les sols de Famenne et Fagnes, à une exception près (7 parcelles). Trois des 7 sols condruziens étaient limono-caillouteux. On dénombre deux sols de texture limono-sableuse et deux de type argile légère, ces derniers sont localisés en région jurassique. A quelques exceptions près, les sols des parcelles d'étude ont un drainage favorable. Au niveau des cultures enregistrées dans les déclarations de superficie de 2014 et 2015, on dénombre de nombreuses céréales d'hiver (épeautre, triticales, froment, seigle ...), des céréales en association avec des légumineuses, des cultures de légumineuses pures et quelques céréales de printemps (avoine, froment, orge). On compte également des cultures de légumes (carottes, poireaux, endives, courges), une culture de lin textile, une culture de quinoa, un maïs ensilage et une culture de pommes de terre. Quatre parcelles étaient en verger au cours des deux années de suivi. On dénombre également quelques prairies temporaires.

Table 1. Caractéristiques des 42 parcelles d'étude du réseau de fermes en agriculture biologique.

Localité	Région agricole	CNSW	Cultures 2014	Cultures 2015
Antheit	Condroz	Aba1	Epeautre	Triticale d'hiver
Aubange	Jurassique	mEbb2	Céréale et légumineuse	Protéagineux et céréale
Barry	Limoneuse	Ada1	-	Fèves et Féveroles
Beloeil	Sablo-limoneuse	kLbb2	Céréale d'hiver	Mélange de céréales
Bleid	Jurassique	EDay	Prairie temporaire	Protéagineux et céréale
Bombaye	Région herbagère	Aba0	Verger	Verger
Buvrinnés	Condroz	Aba(b)1	Céréale et légumineuse	Endives
Chaumont	Limoneuse	Abp0_1	Carottes	Poireaux
Doische	Fagnes&Famenne	fAbb2	Céréale et légumineuse	Céréale et légumineuse

Emines	Limoneuse	Aba1	Triticale	Quinoa
Fosses-la-ville	Condroz	Gbbf0_1_2	Prairie temporaire	Prairie temporaire
Gibecq	Limoneuse	Abp(c)	Céréale d'hiver	Escourgeon
Heure	Fagnes&Famenne	Gbbf2	Prairie temporaire	Epeautre
Houyet A	Fagnes&Famenne	Gbp	Froment de printemps	Triticale d'hiver
Houyet B	Fagnes&Famenne	Gbbf2	Epeautre	Triticale d'hiver
Incourt A	Limoneuse	Aba1	Froment d'hiver	Froment d'hiver
Incourt B	Limoneuse	Abp0_1	Lin textile	Froment d'hiver
Lamine	Limoneuse	Aba1	Orge de printemps	Poireaux
Leernes	Condroz	AbB	Froment de printemps	Seigle d'hiver
Léglise	Ardenne	Gbbfi2(r)	Epeautre	Epeautre
Lessines	Limoneuse	uAep2	Verger	Verger
Marche	Fagnes&Famenne	Gbbfp4	Céréale et légumineuse	Céréale et légumineuse
Mettet	Condroz	Gbbp4	Céréale et légumineuse	Protéagineux et céréale
Montzen	Région herbagère	Gbbfp4	Céréale et légumineuse	Prairie temporaire
Mouscron	Limoneuse	Aca	Pomme de terre	Poireaux
Nethen	Sablo-limoneuse	sAba2_3	Prairie temporaire	Prairie temporaire
Orp	Limoneuse	AbB	Carottes	Froment d'hiver
Ortho	Ardenne	Gbb0_1	Epeautre	Protéagineux et céréale
Peruwelz	Limoneuse	Lca	Légumineuse	Céréale et légumineuse
Pondrôme	Fagnes&Famenne	Gbbk4	Céréale et légumineuse	Céréale et légumineuse
Rendeux	Ardenne	Gbbf0_1	Triticale	Fèves et Féveroles
Seneffe	Limoneuse	Ada1	Céréale et légumineuse	Céréale et légumineuse
Temploux	Condroz	Gbb2	Verger	Verger
Tenneville	Ardenne	fGbb2	Triticale	Orge d'hiver
Vergnies	Fagnes&Famenne	Gbbf0_1_2	Betterave fourragère	Maïs ensilage
Verlaine	Limoneuse	Abp(c)	Epeautre	Autre légume
Vielsalm	Ardenne	Gbbfi2	Epeautre	Avoine de printemps
Vresse	Ardenne	Gbbfi0_1(r)	Céréale et légumineuse	Céréale et légumineuse
Warsage	Région herbagère	Abp	Verger	Verger
Wépion	Condroz	fADa2_3	Carottes	Courges
Weris	Fagnes&Famenne	Gbbkf2	Céréale et légumineuse	Triticale d'hiver
Wiers	Limoneuse	Sc	-	Fèves et Féveroles

Table 2. Paramètres biologiques des sols des 42 parcelles d'étude du réseau de fermes en agriculture biologique pour les années 2014 et 2015 ; Carbone organique total (COT); taux journalier de minéralisation du carbone au cours de l'incubation de 28 jours (Cmin.); taux journalier de minéralisation de l'azote au cours de l'incubation de 28 jours (N min.) ; rapport C/N de la fraction minéralisée au cours de l'incubation de 28 jours (C/N min).

Parcelle	2014				2015			
	COT %	C min. mg/kg/j	N min. kg/ha/j	C/N min.	COT %	C min. mg/kg/j	N min. kg/ha/j	C/N min.
Antheit	1,537	11,79	2,99	15,95	1,568	10,20	2,06	20,01
Aubange	1,931	19,75	3,29	24,34	2,11	13,38	3,14	17,24
Barry	-	-	-	-	1,36	8,11	2,02	16,27
Beloeil	0,921	12,30	3,03	16,44	0,948	6,79	2,66	10,34
Bleid	1,553	13,11	2,29	23,21	1,646	8,46	1,65	20,77
Bombaye	2,43	21,02	5,57	15,29	1,787	11,76	4,03	11,82
Buvrines	1,326	13,07	3,32	15,94	1,591	10,85	3,27	13,45
Chaumont-Gistoux	1,609	12,07	2,69	18,20	1,088	6,06	2,92	8,42
Doische	1,985	10,29	2,24	18,59	2,106	9,37	2,34	16,23
Emines	1,023	6,15	1,55	16,07	1,008	8,50	2,03	16,92
Fosses-la-ville	1,486	9,76	2,22	17,83	1,281	10,34	1,41	29,78
Gibecq	2,225	14,50	4,50	13,07	2,156	11,91	3,94	12,24
Heure	2,711	13,09	4,21	12,59	2,63	9,48	2,98	12,88
Houyet A	2,536	13,47	3,44	15,86	2,214	9,58	2,74	14,16
Houyet B	2,083	8,68	2,99	11,76	2,004	8,84	2,10	17,08
Incourt maraichage	0,926	4,81	1,79	10,85	0,901	8,71	2,05	17,16
Incourt verger	1,123	9,47	2,25	17,02	1,491	11,03	1,75	25,57
Lamine	1,3	4,89	1,37	14,49	1,205	6,84	2,12	13,08
Leernes	1,252	9,60	2,17	17,92	1,169	9,44	2,33	16,38
Léglise	4,983	21,26	6,91	12,46	4,62	11,97	3,84	12,63
Lessines	2,774	22,55	4,74	19,27	2,593	13,90	4,11	13,68
Marche-en-Famenne	3,252	12,61	3,37	15,14	3,005	18,51	5,29	14,18
Mettet	2,992	26,40	6,97	15,33	2,233	19,95	6,36	12,71
Montzen	2,416	18,68	6,59	11,47	2,401	14,10	4,47	12,77
Mouscron	1,61	14,31	2,92	19,86	1,704	7,81	3,62	8,74
Nethen	0,802	11,71	4,38	10,82	0,956	13,35	3,04	17,77
Orp	0,964	8,89	2,17	16,55	0,991	9,03	1,39	26,26
Ortho	2,906	14,32	2,64	21,98	2,925	9,66	3,08	12,73
Peruwelz	0,982	9,77	2,82	14,02	0,945	8,07	2,38	13,71
Pondrôme	3,348	23,27	4,29	21,98	3,366	26,89	2,55	42,75
Rendeux	3,131	14,81	3,84	15,62	2,929	10,35	3,15	13,32
Seneffe	1,284	14,68	3,42	17,36	1,224	10,92	2,72	16,29
Temploux	1,892	19,49	3,53	22,34	2,105	16,73	2,95	22,99
Tenneville	3,08	19,82	4,83	16,60	2,847	15,16	4,40	13,95
Vergnies	2,639	10,27	3,01	13,82	2,327	8,36	2,13	15,88
Verlaine	1,186	9,17	2,52	14,73	1,163	9,80	2,32	17,13

Vielsalm	3,918	22,96	6,05	15,36	3,614	11,89	3,96	12,16
Vresse-sur-Semois	2,81	13,81	4,07	13,75	2,737	9,45	2,77	13,83
Warsage	1,769	18,75	2,56	29,64	1,493	12,30	2,05	24,31
Wépion	4,513	10,97	3,23	13,78	2,682	12,95	2,89	18,16
Weris	2,086	18,52	4,20	17,88	1,849	17,92	2,86	25,41
Wiers	-	-	-	-	1,165	13,14	3,11	17,13
Moyenne	2,13	14,12	3,52	16,63	1,96	11,47	2,93	16,86
Ecart-type	1,01	5,31	1,41	3,94	0,85	4,00	1,03	6,29
Minimum	0,80	4,81	1,37	10,82	0,90	6,06	1,39	8,42
Maximum	4,98	26,40	6,97	29,64	4,62	26,89	6,36	42,75

Comparaison interannuelle

Afin de vérifier la cohérence des données, nous avons comparé les variables d'intérêt parcelle par parcelle entre les deux années de prélèvement (Figure 2,

Figure 3 et Figure 4), sous l'hypothèse que les chiffres suivent la même tendance générale d'une année à l'autre. Pour les trois paramètres d'études, les points suivent globalement la droite 1:1 avec un léger biais en faveur de l'année 2014. Puisque la matière organique du sol représente le substrat minéralisable, il est logique que des teneurs en C organique total légèrement supérieures pour l'année 2014 aillent de pair avec des taux de minéralisation du C et du N légèrement accrus. Ces résultats sont donc rassurants quant à leur fiabilité.

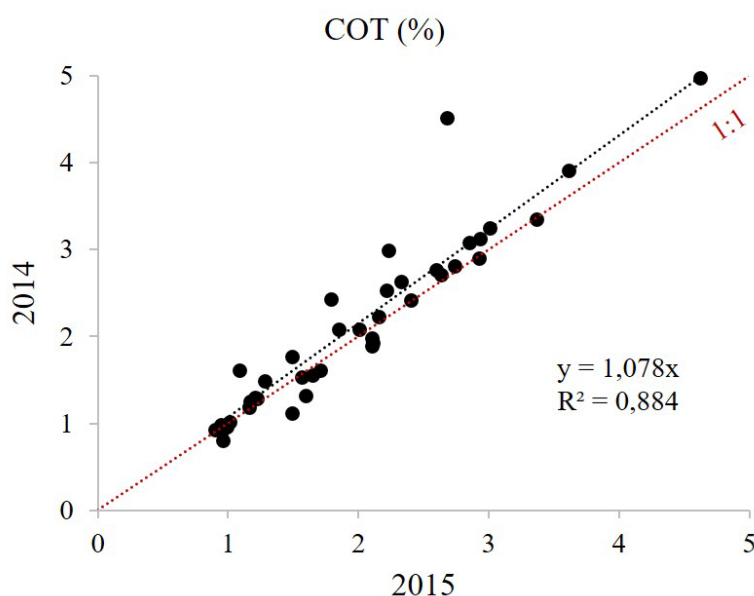


Figure 2. Comparaison des teneurs en carbone organique total (COT) pour les prélèvements 2014 et 2015 dans les parcelles du réseau de fermes en AB.

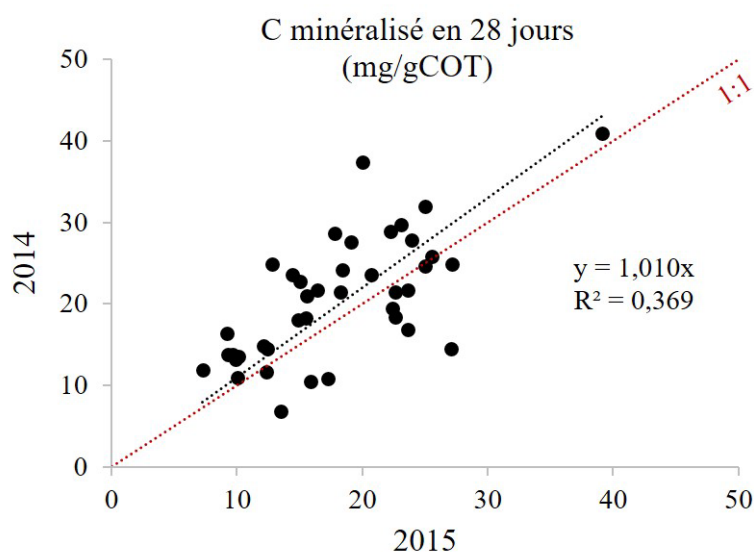


Figure 3. Comparaison de la quantité de C minéralisé en 28 jours pour les prélèvements de 2014 et 2015 dans les parcelles du réseau de fermes en AB.

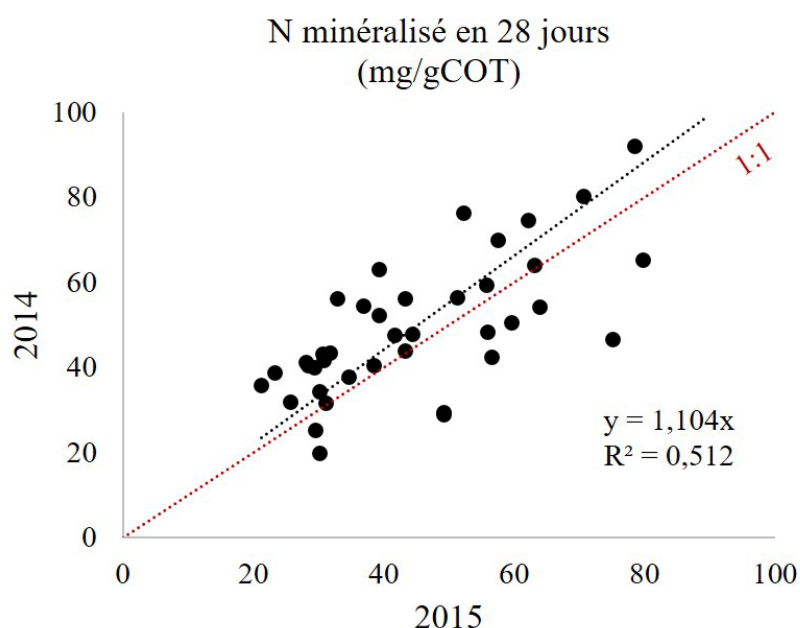


Figure 4. Comparaison de la quantité de N minéralisé en 28 jours pour les prélèvements de 2014 et 2015 dans les parcelles du réseau de fermes en AB.

Statut organique

Les teneurs en COT varient entre 0.80 et 4.98 % pour l'année 2014 pour une valeur moyenne de 2,13 % et entre 0.90 et 4.62 % pour l'année 2015, pour une valeur moyenne de 1.99 % (Table 2). Cette large gamme de valeurs s'explique notamment par la diversité de situations rencontrées en termes d'affectation des sols (grandes cultures, maraîchage, prairies temporaires, vergers), de types de sols et de régions agricoles.

En règle générale, les pratiques mobilisées en agriculture biologique permettent de maintenir de bons taux de matières organiques (Lori et al., 2017). L'amélioration du statut organique des parcelles en AB peut

s'expliquer par une augmentation de l'application de matières organiques exogènes (Gattinger et al., 2012) (engrais de ferme, engrais organiques), par l'allongement des rotations et la diversification des cultures (McDaniel et al., 2014) ainsi que par une augmentation des restitutions (résidus de culture, cultures intermédiaires). Pour vérifier l'hypothèse d'une augmentation des teneurs en matière organique des sols en AB dans notre contexte régional, les teneurs en COT des sols du réseau de ferme en AB des années 2014 et 2015 ont été comparées aux valeurs de COT moyennes et médianes pour chacune des régions agricoles de Wallonie, calculées à partir de la base de données REQUASUD (Figure 5). L'analyse a été limitée aux sols de culture, après exclusion des vergers dont l'enherbement de l'interligne peut influencer les teneurs en COT, qui ne seront dès lors plus représentatives des parcelles fruitières.

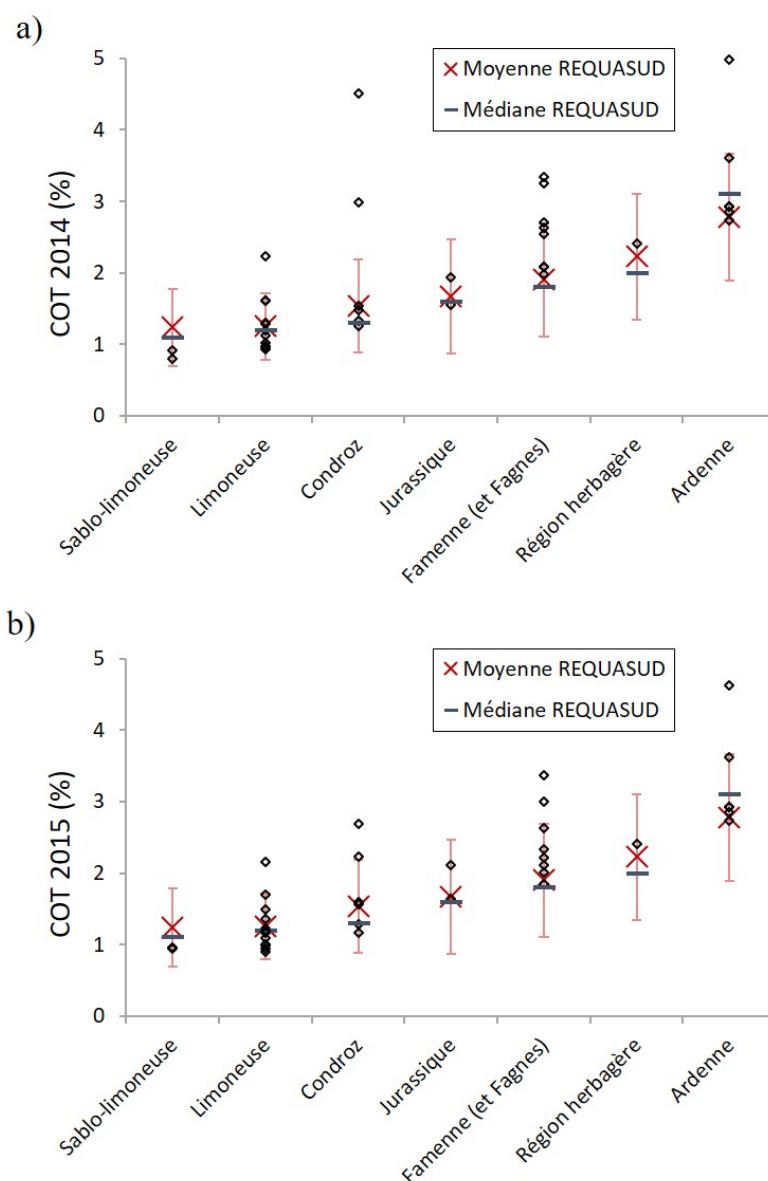


Figure 5. Comparaison des teneurs en carbone organique total (COT) pour les terres de cultures (après retrait des vergers) du réseau de fermes en AB aux valeurs médianes et moyennes des régions agricoles concernées, calculées grâce à la base de données REQUASUD. Les barres d'erreur en rouge représentent l'écart-type autour de la moyenne pour les régions agricoles. a) Résultats pour l'année 2014 ; b) Résultats pour l'année 2015.

Il ressort de l'analyse que 64 % des terres de culture de notre étude possédaient des teneurs en COT supérieures aux valeurs médianes des régions agricoles respectives pour l'année 2014 (Figure 5a) et 58 % pour l'année 2015 (Figure 5b). Ce résultat suggère que l'AB tend à améliorer le statut organique des terres de cultures en Wallonie. Un même constat a été dressé en Flandres pour la province de Flandre orientale, suite à la comparaison du statut organique de sols de 42 parcelles en AB (21 fermes, 2 parcelles par ferme) aux données provinciales (De Neve et al., 2006). En effet, cette étude a révélé que par rapport aux tendances provinciales, une proportion supérieure des parcelles gérées en AB appartenait aux classes de teneurs en COT élevées en matière organique (Figure 6). Une certaine proportion de ces parcelles possédait, malgré tout, des teneurs en C organique (très) faibles. Les teneurs en C organique des parcelles étudiées ont pu être mises en lien avec la fréquence d'apport d'engrais organiques (compost et engrais de ferme) (De Neve et al., 2006), ce qui souligne que la fertilisation organique, notamment via les apports en matières organiques exogènes, est un facteur clé du statut organique des sols agricoles gérés en AB (De Neve et al., 2006).

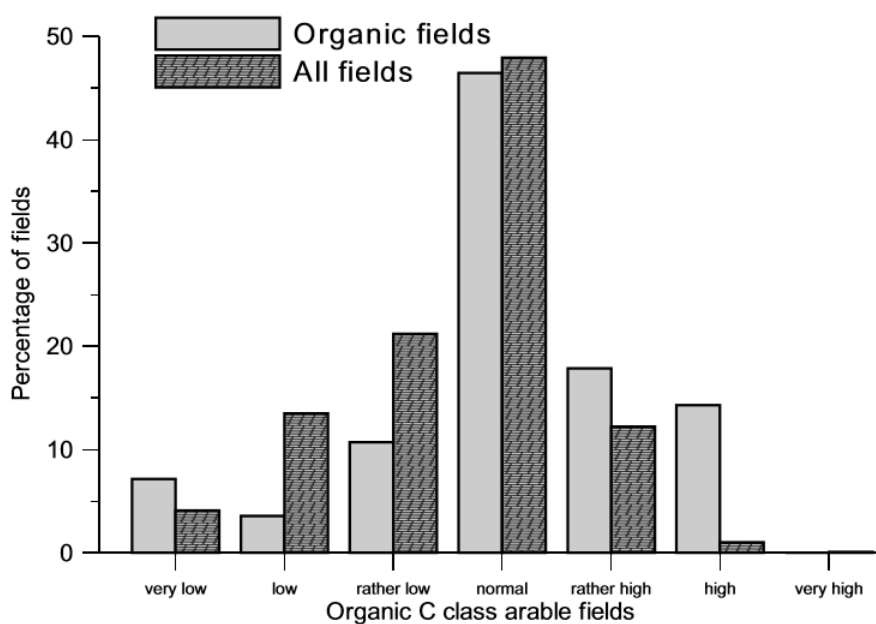


Figure 6. Distribution du contenu en C organique du sol (0-30 cm) de 42 parcelles en agriculture biologique (Organic fields) de Flandre orientale en comparaison avec les données provinciales (par De Neve et al., 2006).

Afin de tester l'hypothèse que l'accès aux engrais de ferme est un levier important pour maintenir des taux de matière organique élevés dans les sols de cultures, les données de COT ont été analysées en regard du type de ferme, après exclusion des exploitations en arboriculture (Figure 7). L'hypothèse de départ était que les parcelles des fermes à dominance herbagère et en polyculture-élevage, productrices d'engrais de ferme et donc plus sujettes à en appliquer sur leurs terres, doivent posséder des teneurs en COT supérieures à celles des fermes sans élevage. L'analyse a été réalisée sur des données de COT normalisées par rapport aux valeurs médianes de COT de leurs régions agricoles respectives (calculées par différence avec la médiane régionale).

Au regard des résultats, les fermes à dominance herbagère et en polyculture-élevage possèdent des teneurs en COT en moyenne supérieures de respectivement 0.17 et 0.28 % aux fermes de grandes cultures sans élevage (Figure 7). Ce résultat suggère que l'accès aux engrais de ferme tend effectivement

à améliorer le statut organique des sols agricoles en AB. Néanmoins, aucune différence significative n'apparaît entre les différents types d'exploitation au regard de l'analyse statistique ($P=0.736$), sans doute en raison de la variabilité importante au sein d'un même type de ferme. L'hétérogénéité des résultats au sein d'un type d'exploitation souligne que les teneurs en matière organique des sols dépendent de nombreux facteurs, tant au niveau du mode de gestion (historique cultural, rotation, pratiques agricoles, ...) que de l'environnement de la parcelle (type de sol, climat, ...). Le manque d'accès aux engrais de ferme pourrait expliquer le fait qu'une majorité des parcelles de notre étude localisées en région limoneuse possède une teneur en COT (légèrement) inférieure à la moyenne régionale (Figure 5). En effet, seules deux des exploitations concernées sont des exploitations de polyculture-élevage, pour une majorité d'exploitations en grande culture sans élevage. Au contraire, les parcelles de Famenne possèdent toutes de teneurs en COT supérieures à la moyenne et à la médiane régionale (Figure 5). Or, toutes ces exploitations sont herbagères ou en polyculture-élevage. Outre la production d'engrais de ferme, ce type de ferme produit de nombreuses cultures fourragères, incluant des prairies temporaires qui ont un impact particulièrement positif sur le statut organique des sols (Velthof and Oenema, 2001). Certains taux de COT très élevés peuvent également être le reflet de la destruction récente d'une prairie permanente pour sa mise en culture, notamment en maraîchage.

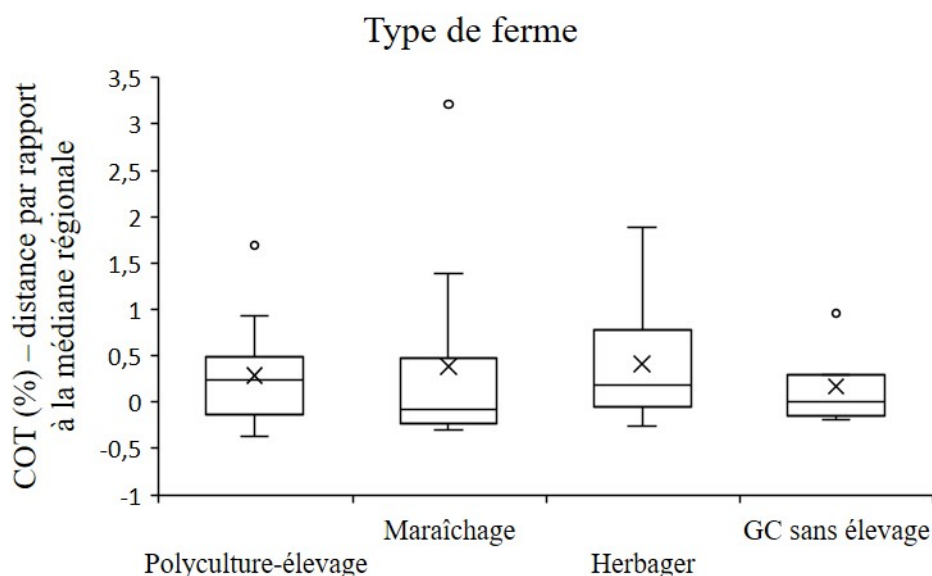


Figure 7. Distribution des teneurs en carbone organique total (COT) normalisées par rapport aux valeurs médianes de COT de leur région agricole respective, par type de ferme. Les exploitations en arboriculture ont été exclues de l'analyse.

Les teneurs en COT ont également été mises en regard du temps de conversion des parcelles vers l'AB après normalisation par rapport aux valeurs médianes de COT de leurs régions agricoles respectives. N'ayant accès qu'à l'historique récent des parcelles (maximum 5 années avant le prélèvement), l'analyse a été effectuée en séparant les parcelles en deux groupes relativement homogènes en termes de nombre, à savoir les conversions récentes à l'AB (moins de cinq ans) et les conversions plus anciennes (cinq ans et plus) (Figure 8). A l'instar de l'analyse par type de ferme, le temps de conversion à l'AB n'induit aucune différence statistiquement significative ($P=0.396$). Cependant, les parcelles converties à l'AB il y a cinq ans ou plus possèdent une teneur en COT en moyenne de 0.14 % supérieure à celles converties à l'AB plus récemment. En regard de la Figure 8, cette différence semble s'expliquer par un nombre plus important de

parcelles avec des valeurs élevées par rapport à la médiane régionale, ce qui concorde avec les résultats de De Neve et al. (2006). Il faut souligner toutefois que l'atteinte d'un nouvel état d'équilibre pour le statut organique d'une parcelle suite à un changement de pratique peut prendre plusieurs dizaines d'années, comme en atteste les résultats des essais longue durée du CRA-W (Roisin, communication personnelle). Dès lors, il est probable que le statut organique actuel des parcelles étudiées reflète plus les pratiques agricoles en amont de la conversion à l'AB que des pratiques actuelles, en tout cas pour les historiques récents.

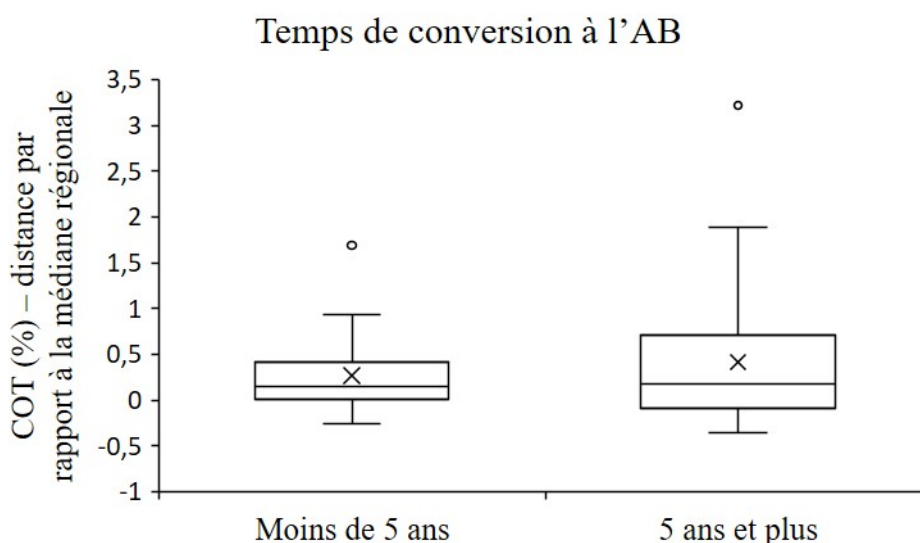


Figure 8. Distribution des teneurs en carbone organique total (COT) normalisées par rapport aux valeurs médianes de COT de leurs régions agricoles respectives en fonction de leur temps de conversion vers l'AB. Les exploitations en arboriculture ont été exclues de l'analyse.

De l'analyse des chiffres, il ressort donc que le statut organique des parcelles en AB est supérieur aux valeurs médianes des régions agricoles dans environ 60 % des cas, et qu'il est plus fréquent d'observer des teneurs élevées en COT pour les parcelles les plus anciennement converties à l'AB. Les parcelles de fermes herbagères et de polyculture-élevage tendent à avoir un meilleur statut organique que les parcelles des autres types d'exploitation, ce qui pourrait être le reflet d'un meilleur accès aux engrais de ferme ou de l'influence positive de la prairie sur le statut organique des sols. Néanmoins, les différences observées entre les types d'exploitations ne sont pas significatives statistiquement. L'hétérogénéité des résultats au sein d'un type d'exploitation souligne que les teneurs en matière organique des sols dépendent de nombreux facteurs, tant au niveau du mode de gestion (historique cultural, rotation, pratiques agricoles, ...) que de l'environnement de la parcelle (type de sol, climat, ...). Outre l'augmentation de l'application de matières organiques exogènes, l'allongement des rotations, la diversification des cultures et l'augmentation des restitutions (restitution des pailles, cultures intermédiaires) sont connues pour améliorer le statut organique des sols et font partie des pratiques souvent observées chez les agriculteurs en AB.

Minéralisation potentielle du C

Au terme des 28 jours d'incubation, la minéralisation moyenne journalière varie entre 4.8 et 26.9 mg de C par kg de sol, avec une valeur moyenne de 14.1 mg de C par kg de sol et par jour pour l'année 2014 et 11.5 mg de C par kg de sol et par jour pour l'année 2015. Comme pour le statut organique, cette variabilité importante entre les différentes parcelles d'étude est sans nul doute le reflet d'une large diversité de conditions culturales et pédo-climatiques.

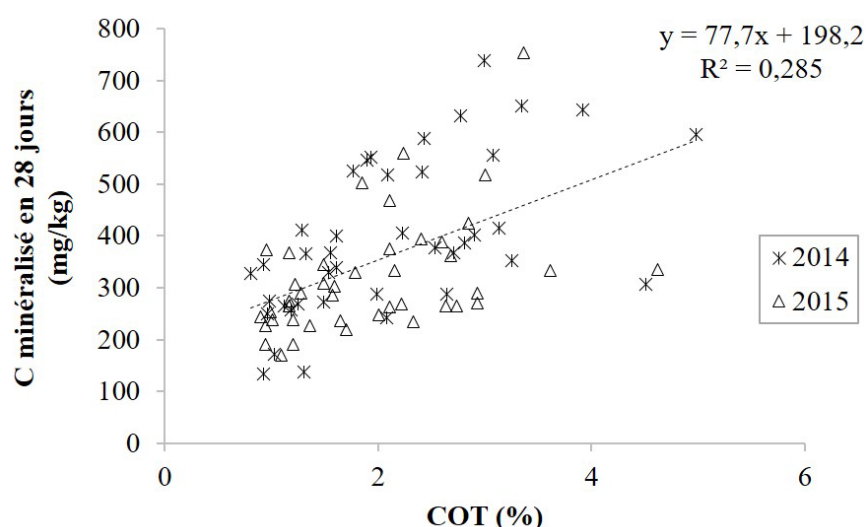


Figure 9. Emissions de CO₂ cumulées après 28 jours d'incubation en fonction de la teneur en carbone organique total du sol pour les années 2014 et 2015.

Mis en regard des variables potentiellement explicatives (type de sol, statut organique, régions agricoles, type de culture), il ressort que le taux de minéralisation du C du sol tend à augmenter avec la teneur en COT du sol (Figure 9). C'est un constat assez logique puisque la matière organique du sol représente le substrat de la respiration hétérotrophe. La relation entre le C minéralisé en 28 jours et le COT est relativement bien appréhendée par un modèle linéaire (Figure 9). Néanmoins, la droite de la relation possède une ordonnée à l'origine largement positive, ce qui indique que les taux de minéralisation par unité de COT tendent à être plus élevés pour les basses valeurs de COT.

Pour se défaire de la corrélation forte entre la respiration du sol et la teneur en COT, les quantités de CO₂ minéralisées ont été rapportées à l'unité de C (et donc à la quantité de substrat minéralisable présent dans le sol). Exprimé ainsi, le taux de respiration donne une information uniquement sur la cinétique de dégradation de la matière organique du sol, et ne dépend donc plus de la quantité de substrat. Cette transformation permet donc de comparer sur une base objective les cinétiques de minéralisation du C entre différents sols ayant des niveaux de matière organique différents (une prairie temporaire ardennaise et une terre de culture en région limoneuse, par exemple). Pour illustrer cela, nous avons pris pour exemple l'évolution des émissions de CO₂ de 4 sols contrastés choisis dans les quatre grands types de fermes du réseau (Figure 10). Le graphe de la Figure 10a représente les taux d'émission de CO₂ par masse de sol. Les émissions de CO₂ des différentes parcelles sont, dans l'ordre croissant, Maraîchage < Grande Culture < Polyculture-élevage < Arboriculture. Une fois les émissions rapportées à l'unité de carbone (Figure 10b), l'ordre de parcelles devient Polyculture-élevage < Maraîchage < Arboriculture < Grande Culture. Cet

exemple met en évidence que les deux indicateurs ne donnent pas la même information, et que le taux de respiration n'a de sens que s'il est mis en regard du statut humique du sol.

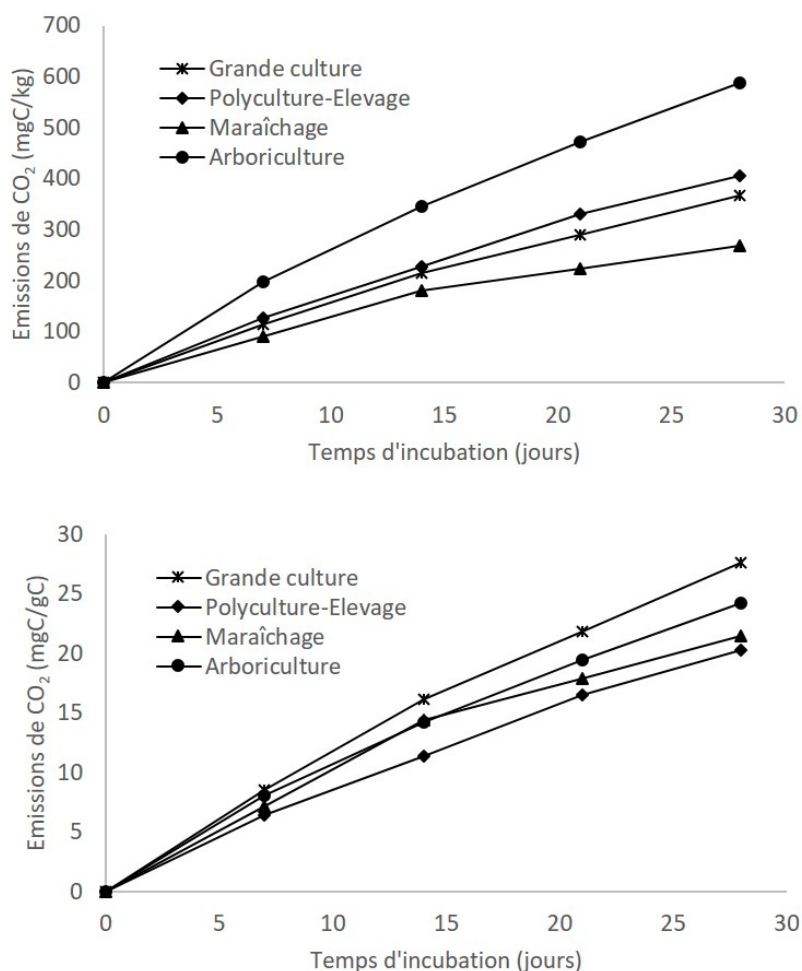


Figure 10. Exemple de courbe d'émissions de CO₂ au cours du temps pour quatre parcelles issues des quatre grand types d'exploitation agricole étudiées ; les émissions sont exprimées a) par masse de sol et b) par masse de carbone.

Les taux de minéralisation ont été analysés selon les autres variables explicatives potentielles (type de sol, régions agricoles, régions climatiques, type de culture) après avoir été exprimés par unité de COT, ce qui revient à normaliser les valeurs selon le contenu en COT du sol de la parcelle. Cette analyse a permis de dégager quelques tendances supplémentaires :

- Les sols de texture sablo-limoneuse et limono-sableuse (S et L) possèdent des taux de minéralisation supérieurs à la moyenne (Figure 11). Ce résultat suggère que les sols de texture plus légère, possédant des teneurs en argiles faibles, ont un faible potentiel de stabilisation de la matière organique. En effet, les teneurs en COT de ces parcelles sont faibles ($< 10 \text{ g kg}^{-1}$). Ce résultat souligne l'importance des associations organo-minérales, dépendante de la fraction fine des sols ($< 20 \mu\text{m}$) dans la stabilisation de la matière organique du sol.
- Les sols de Famenne, de Fagnes et d'Ardenne possèdent des taux de minéralisation par unité de C inférieurs à la moyenne (Figure 12). Puisque l'ensemble de ces sols sont formés sur des roches-mères de type schiste, schisto-phylade ou calcaire (sols caillouteux, classe de texture G), dont les

produits d'altération sont riches en argile et limons fins, on peut émettre l'hypothèse que leurs taux de minéralisation relativement faibles sont dus à une fraction fine importante favorisant les interactions organo-minérales.

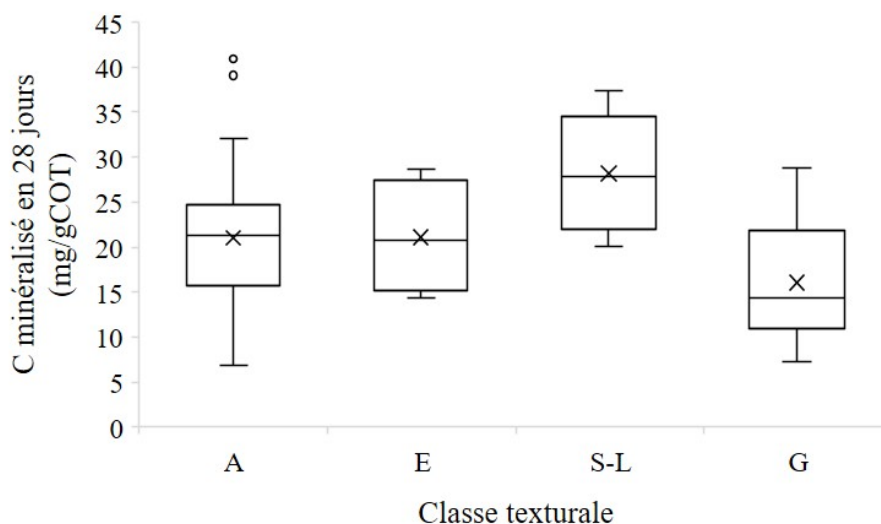


Figure 11. C minéralisé en 28 jours d'incubation, exprimé par unité de carbone organique total, en fonction de la classe texturale du sol.

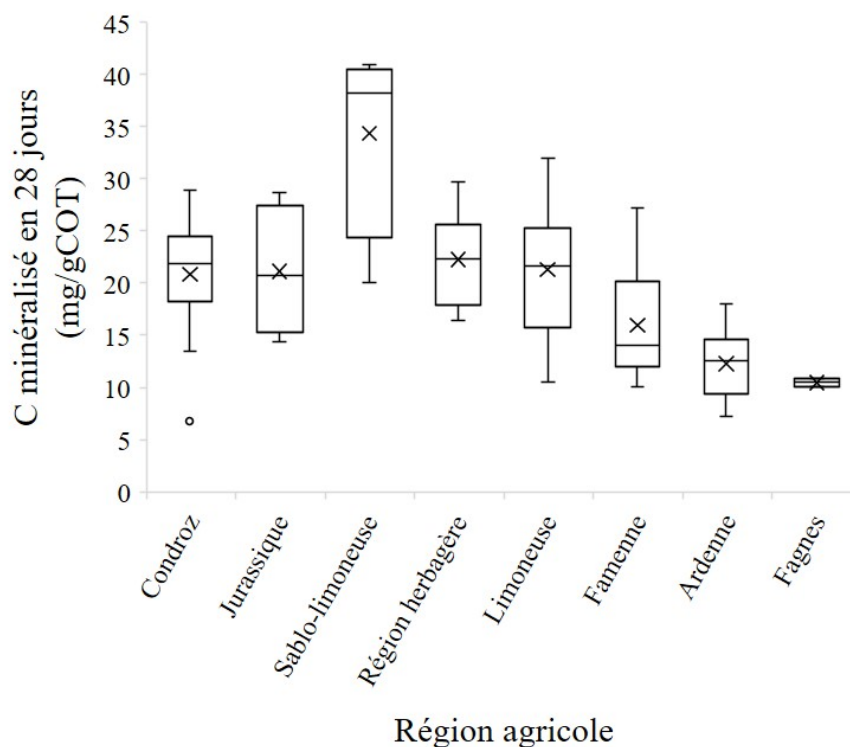


Figure 12. C minéralisé en 28 jours d'incubation, exprimé par unité de carbone organique total, en fonction de la région agricole.

Puisque les engrais organiques représentent un élément essentiel de la fertilité en agriculture biologique, on s'attend à ce que les taux de respiration en AB soient en moyenne supérieurs à ceux mesurés en agriculture conventionnelle, en raison d'un statut organique amélioré (Gattinger et al., 2012). L'hypothèse n'a pas pu être testée au cours de cette étude, faute de données de minéralisation du C pour l'agriculture conventionnelle. Néanmoins, une méta-analyse récente de l'effet de l'AB sur les paramètres biologiques des sols (Lori et al., 2017) incluant 149 parcelles en AB appariées à un témoin en agriculture conventionnelle a montré que la respiration du sol était en moyenne 20 % supérieure en AB par rapport au témoin conventionnel. En parallèle, les teneurs en C organique du sol étaient en moyenne augmentée de 19 %, soit de manière proportionnelle à cet accroissement du taux de respiration. Ce résultat suggère donc que l'augmentation du taux de respiration du sol en AB est essentiellement dû à l'amélioration de leur statut organique. Celle-ci s'explique généralement par la hausse de l'application de matières organiques exogènes (Gattinger et al., 2012) (engrais de ferme, engrais organiques), par l'allongement des rotations et la diversification des cultures (McDaniel et al., 2014) ainsi que par une augmentation des restitutions (résidus de culture, cultures intermédiaires).

Minéralisation potentielle de l'N

Au terme des 28 jours d'incubation à 28 °C, la minéralisation moyenne journalière varie entre 1.37 et 6.97 kg de N par ha, avec une valeur moyenne de 3.52 kg N par ha par jour pour l'année 2014 et 2.93 kg N par ha par jour pour l'année 2015. Comme pour la minéralisation du C, une relation significative a été mise en évidence entre les taux de minéralisation de l'N et les teneurs en COT (Figure 13). Le statut organique est ainsi la clé de voûte de la fourniture naturelle en N par le sol. Si on considère que 28 jours d'incubation à 28 °C correspondent à plusieurs mois de minéralisation en conditions de terrain (cette conversion jours labo-jours champs peut être déterminée avec précision pour une année climatique normale par la méthode des jours normalisés), on peut considérer que 1 % de COT fournit de l'ordre de 65 kg N ha⁻¹ entre début mars et fin juillet et que 2 % de COT permettront d'économiser 90 unités d'N en moyenne sur cette période.

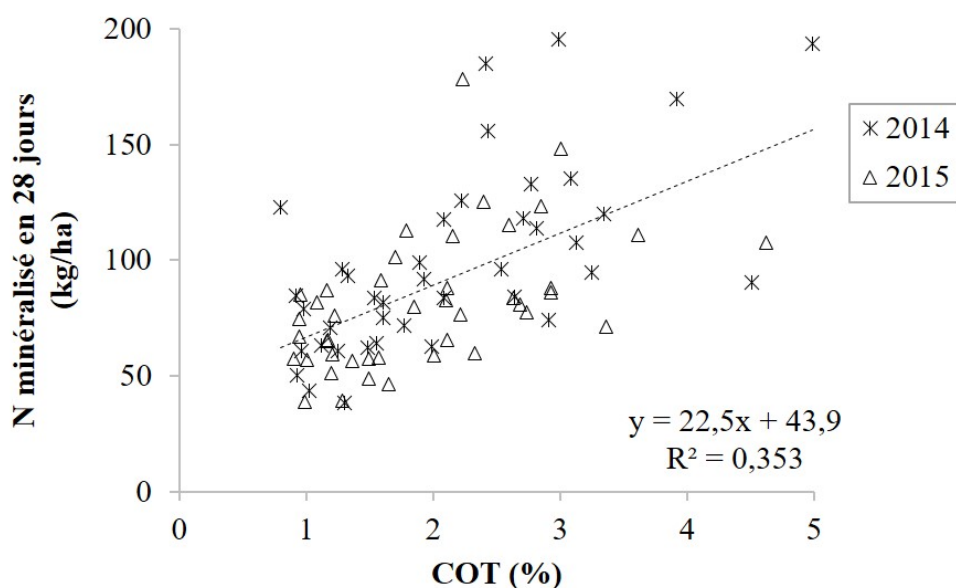


Figure 13. Quantité d'N minéralisé après 28 jours d'incubation en fonction de la teneur en carbone organique total du sol pour les années 2014 et 2015.

Puisqu'il existe une relation aussi bien entre les taux de minéralisation du C que du N avec le statut organique des sols d'étude, il n'est pas étonnant d'observer une corrélation forte ($r=0.66$) entre les taux de minéralisation du C et du N (Figure 14). Le rapport C/N de la fraction minéralisée varie entre 8.4 et 42.7, pour une valeur moyenne de 16.6 en 2014 et 16.9 en 2015. Ce résultat suggère que, malgré la diversité de contexte pédo-climatiques et culturaux, la matière organique minéralisable des sols d'étude a un rapport C/N relativement constant et faible.

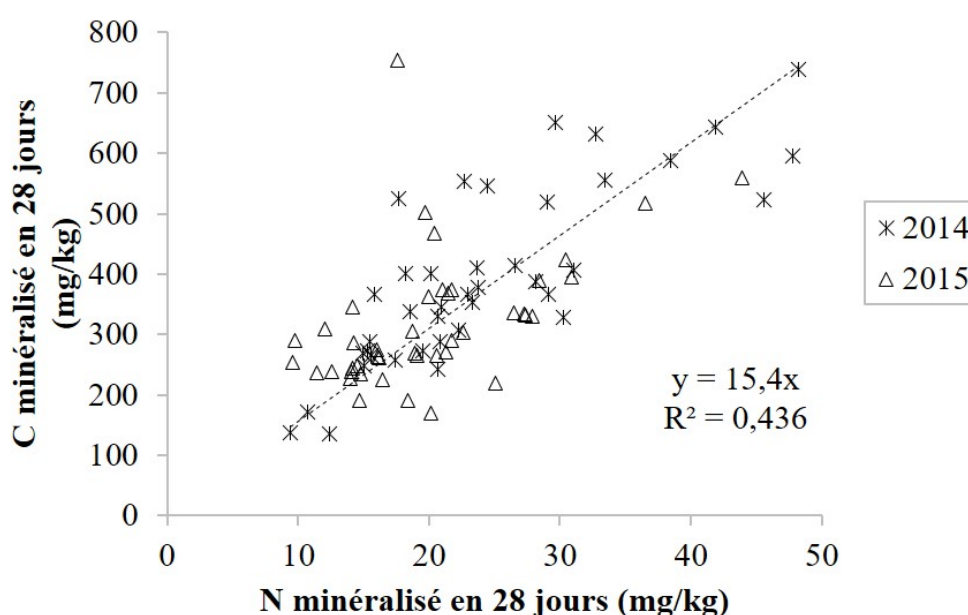


Figure 14. Quantité de carbone minéralisée en fonction de la quantité d'azote minéralisée en 28 jours d'incubation, après retrait d'une valeur aberrante.

Les taux de minéralisation de l'N, rapportés à l'unité de COT en guise de normalisation, et le rapport C/N de la fraction minéralisée ont fait l'objet d'une analyse par type d'antécédent cultural (Figure 15, Figure 16). Pour cet exercice, les antécédents culturaux ont été rassemblés en neuf classes, à savoir les céréales d'hiver, les céréales de printemps, les mélanges céréales-légumineuses, les légumineuses pures, les légumes, les prairies temporaires, les vergers et une catégorie « autres » qui rassemble des cultures diverses n'apparaissant qu'une seule fois.

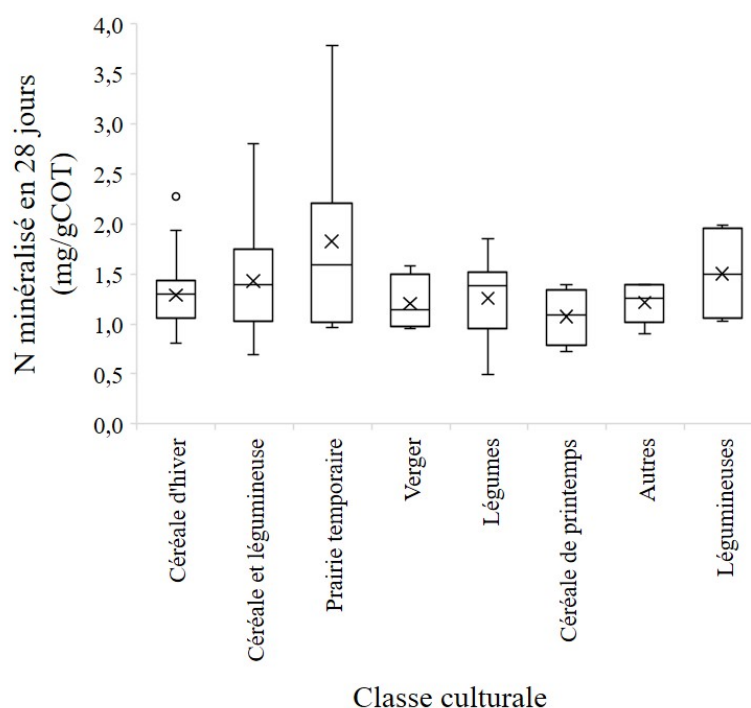


Figure 15. N minéralisé en 28 jours, exprimé par unité de COT, pour les différents types d'antécédents cultureux (cultures principales reprises dans la déclaration de superficie).

L'analyse des taux de minéralisation de l'N en fonction des antécédents cultureux (Figure 15) révèle plusieurs éléments intéressants. Tout d'abord, la minéralisation de l'N est réduite de 18 % en moyenne après une céréale de printemps (1.07 mg/gCOT, n=4) par rapport à une céréale d'hiver (1.30 mg/gCOT, n=26). Un élément d'explication possible est le cycle de développement plus long de la céréale d'hiver par rapport à la céréale de printemps. En conséquence, le système racinaire de la céréale d'hiver est plus développé, ce qui pourrait expliquer des restitutions de matières organiques décomposables accrues après récolte, et donc des taux de minéralisation supérieurs. A noter aussi que les céréales de printemps sont marginales par rapport aux céréales d'hiver. En conséquence cette classe culturale est peu représentée dans notre base de données (n=4) et la représentativité des chiffres peut être mise en question. Au contraire, la minéralisation de l'N est augmentée d'environ 15 % en moyenne après un mélange céréale-légumineuse (1.41 mg/gCOT, n=19) par rapport à une céréale d'hiver, et de 22 % après une culture de légumineuse pure (1.50 mg/gCOT, n=4). De par leur capacité à fixer de l'azote atmosphérique, les légumineuses possèdent des taux de protéines élevés et un rapport C/N relativement faible, ce qui peut expliquer la hausse de minéralisation de l'N enregistrée après la culture. Parmi toutes les classes culturales étudiées, les prairies temporaires possèdent les taux de minéralisation de l'N les plus élevés (1.86 mg/gCOT, n=7), soit 42 % de plus que la fourniture des céréales d'hiver (1.36 mg/gCOT). Ce résultat peut s'expliquer par les quantités d'N importantes accumulées dans la biomasse racinaire et la matière organique du sol de la prairie qui, malgré son caractère temporaire, possède une durée d'enracinement de plusieurs années (jusqu'à 5 ans) et donc largement supérieure aux cultures en rotation. En outre, les graminées prairiales possèdent un rapport C/N proche de 30 et sont souvent associées avec des légumineuses qui vont améliorer la nutrition azotée de la prairie. L'antécédent cultural a par contre relativement peu d'effet sur le C/N de la fraction minéralisée, avec des valeurs comparables entre les

différentes classes culturales à l'exception des prairies temporaires et des vergers qui montrent des valeurs de C/N quelque peu supérieures aux valeurs des autres classes (Figure 16).

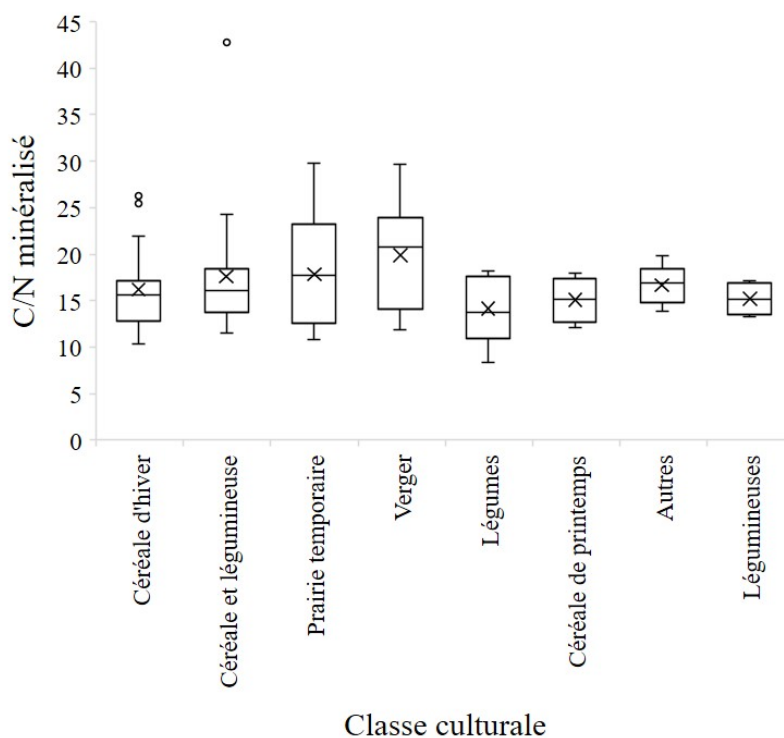


Figure 16. Rapport C/N de la fraction minéralisée pour les différents types d'antécédents cultureux (cultures principales reprises dans la déclaration de superficie).

Afin de répondre à la question de l'effet de l'agriculture biologique sur les variables d'intérêt, nous avons comparé les taux de minéralisation de l'N du sol des parcelles du réseau de fermes en AB localisées en région limoneuse et sablo-limoneuse avec les taux de minéralisation d'une sélection de sols de la convention CARBIOSOL (Figure 17).

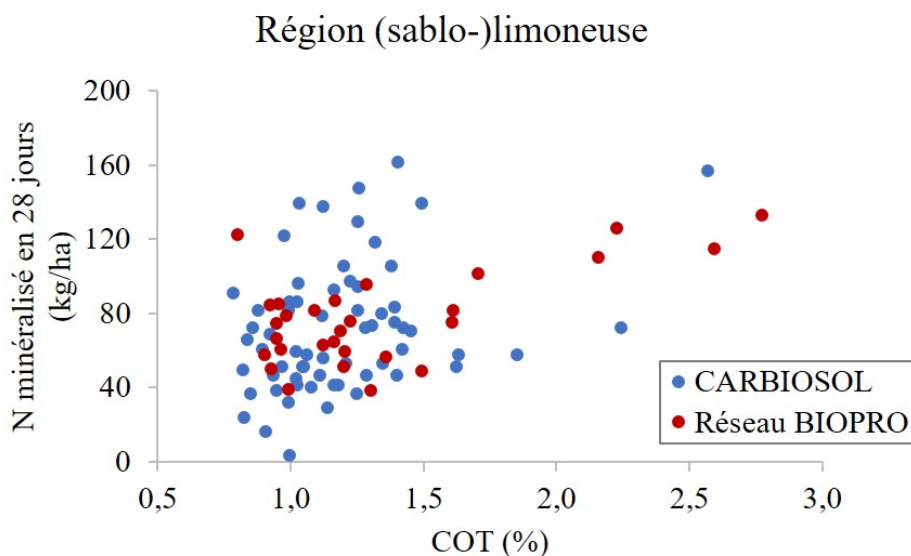


Figure 17. N minéralisé en 28 jours en fonction des teneurs en carbone organique total des sols du réseau de fermes en agriculture biologique localisés en région (sablo-)limoneuse et de témoins en agriculture conventionnelle de la base de données CARBIOSOL.

La comparaison ne permet pas de conclure que les sols en agriculture biologique possèdent des taux de minéralisation de l'N différents de ceux de l'agriculture conventionnelle. En effet, le nuage de point du graphe de la Figure 17 est complètement inclus dans la gamme de données CARBIOSOL. Ce résultat n'est pas étonnant puisque les processus d'ammonification et de nitrification sont assurés par des grands groupes de microorganismes largement représentés au niveau du sol, quel que soit le mode de gestion de la parcelle. Néanmoins, les situations en AB et en agriculture conventionnelle n'étaient pas strictement comparables en termes d'antécédent cultural. Un jeu de données mieux contraint à cet égard pourrait améliorer la comparaison qui, rappelons-le, n'était pas l'objectif de cette étude qui visait principalement à établir des références pour l'agriculture biologique.

Conclusions

De l'analyse des résultats issus de ces suivis, il ressort que le statut organique des parcelles en AB est supérieur aux valeurs médianes des régions agricoles dans environ 60 % des cas, et qu'il est plus fréquent d'observer des teneurs élevées en COT pour les parcelles converties à l'AB de plus longue date. Les parcelles de fermes herbagères et de fermes en polyculture-élevage tendent à avoir un meilleur statut organique que les parcelles des autres types d'exploitation, ce qui pourrait être le reflet d'un meilleur accès aux engrais de ferme ou de l'influence positive de la prairie sur le statut organique des sols. Néanmoins, les différences observées entre les types d'exploitations ne sont pas significatives statistiquement. L'hétérogénéité des résultats au sein d'un type d'exploitation souligne que les teneurs en matière organique des sols dépendent de nombreux facteurs, tant au niveau du mode de gestion (historique cultural, rotation, pratiques agricoles, ...) que de l'environnement de la parcelle (type de sol, climat, ...). Outre l'augmentation de l'application de matières organiques exogènes, l'allongement des rotations, la diversification des cultures et l'augmentation des restitutions (restitution des pailles, cultures intermédiaires) sont connues pour améliorer le statut organique des sols et font partie des pratiques régulièrement rencontrées chez les agriculteurs en AB.

De manière générale, plus il y a de matière organique dans le sol, plus la respiration du sol sera importante, tout comme la fourniture naturelle du sol en N minéral. Le statut organique est ainsi la clé de voûte de la fourniture naturelle en N par le sol. On peut considérer que 1 % de COT contribue à minéraliser de l'ordre de 65 kg N ha⁻¹ dans la période de croissance d'une culture au printemps et que 2 % de COT permettront d'économiser 90 unités d'N en moyenne. Les fluctuations autour de la tendance peuvent s'expliquer par certaines propriétés intrinsèques du sol et par la quantité, la qualité et la temporalité des restitutions. Après les céréales de printemps, nous avons mesuré une fourniture en N de 18 % inférieure par rapport à une céréale d'hiver. Celle-ci pourrait être le reflet d'un enracinement moins développé au moment de la récolte et donc de moindres restitutions par la biomasse racinaire. Au contraire, une hausse de 15 % de fourniture en N a été mesurée après un mélange céréale-légumineuse et de l'ordre de 22 % pour une culture de légumineuse pure par rapport à une céréale d'hiver pure. Pour l'ensemble de nos données, nous obtenons un rapport C/N d'environ 16.5 pour la fraction minéralisée.

Concernant la fourniture en N du sol, les taux de minéralisation des sols des parcelles en AB ont été comparés aux taux de minéralisation en N d'une sélection de parcelles de la convention CARBIOSOL. Cette comparaison n'a mis en avant aucune différence de potentiel de fourniture en N des sols en AB par rapport aux sols en agriculture conventionnelle. Ce résultat n'est pas étonnant puisque les processus de minéralisation du C et du N représentent la base du fonctionnement des microorganismes hétérotrophes du sol, quel que soit le mode de gestion de la parcelle.

De manière générale, l'AB exerce un effet positif sur les paramètres biologiques des sols (Fließbach et al., 2007; Lori et al., 2017; Mäder et al., 2002). Afin d'aller plus loin dans l'évaluation de l'influence de l'AB sur la fertilité biologique des sols dans notre contexte régional, il serait intéressant d'évaluer la performance des parcelles du réseau de fermes pour d'autres indicateurs d'abondance et de diversité de la micro- et de la macrofaune, avec un regard accentué sur les organismes pathogènes et auxiliaires des cultures. Des études récentes ont mis en évidence le lien entre diversité et efficacité d'utilisation des ressources (Maron et al., 2018), ainsi qu'une plus grande résilience du système face à certains pathogènes des cultures (Vivant et al., 2013). Il serait donc pertinent d'établir s'il existe un lien entre les pratiques agricoles mobilisées en AB et la biodiversité de la micro- et de la macrofaune des sols wallons et, le cas échéant, vérifier leurs effets sur l'efficacité et la résilience des systèmes agraires.

Références

- Araújo, A. S. F., Leite, L. F. C., Santos, V. B., and Carneiro, R. F. V. (2009). Soil microbial activity in conventional and organic agricultural systems. *Sustainability* 1, 268–276. doi:10.3390/su1020268.
- Buysse, P., and Aubinet, M. (2010). La respiration hétérotrophe dans les sols agricoles: Description des facteurs importants et comparaison de modèles semi-mécanistes existants. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 14, 707–717.
- Chartin, C., Vincent, Q., Carnol, M., and van Wesemael, B. (2019). CARBIOSOL 5- 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. Rapport final.
- COMIFER (2013). *Calcul de la fertilisation azotée - Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales - Cultures annuelles et prairies*. Paris, France: COMIFER Available at: www.comifer.asso.fr.
- De Neve, S., Van Den Bossche, A., Sleutel, S., and Hofman, G. (2006). Soil phosphorus status of organic farming in Flanders: an overview and comparison with the conventional management. *Biol. Agric. Hortic.* 24, 217–235. doi:10.1079/SUM2005355.
- Fließbach, A., Oberholzer, H. R., Gunst, L., and Mäder, P. (2007). Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118, 273–284. doi:10.1016/j.agee.2006.05.022.
- Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., et al. (2012). Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, 18226–18231. doi:10.1073/pnas.1209429109.
- Kukreja, R., and Meredith, S. (2011). *Resource Efficiency And Organic Farming: Facing up to the challenge*. Brussels, Belgium: IFOAM EU Group Available at: <http://www.ifoam-eu.org>.
- Lori, M., Symnaczik, S., Mäder, P., De Deyn, G., and Gattinger, A. (2017). Organic farming enhances soil microbial abundance and activity—A meta-analysis and meta-Regression. *PLoS One* 12, 1–25. doi:10.1371/journal.pone.0180442.
- Mäder, P., Fließbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., and Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* (80-.). 296, 1694–1697. doi:10.1126/science.1071148.
- Maron, P. A., Sarr, A., Kaisermann, A., Lévêque, J., Mathieu, O., Guigue, J., et al. (2018). High microbial diversity promotes soil ecosystem functioning. *Appl. Environ. Microbiol.* 84, e02738-17. doi:10.1128/AEM.02738-17.
- McDaniel, M. D., Tiemann, L. K., and Grandy, A. S. (2014). Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. *Ecol. Appl.* 24, 560–570. doi:10.1890/13-0616.1.
- Velthof, G. L., and Oenema, O. (2001). Effects of ageing and cultivation of grassland on soil nitrogen. *Alterra, Green World Res.*, 56 pp.
- Vincent, Q., Chartin, C., Krüger, I., van Wesemael, B., and Carnol, M. (2019). CARBIOSOL: Biological indicators of soil quality and organic carbon in grasslands and croplands in Wallonia, Belgium. *Submitt. Ecol.*
- Vivant, A. L., Garmyn, D., Maron, P. A., Nowak, V., and Piveteau, P. (2013). Microbial Diversity and Structure Are Drivers of the Biological Barrier Effect against *Listeria monocytogenes* in Soil. *PLoS One* 8, 1–11. doi:10.1371/journal.pone.0076991.
- Walkley, A., and Black, I. A. (1934). An Examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29–38.