



Effet des pratiques agricoles sur la minéralisation brute de l'azote et de la décomposition de la litière dans une argile limoneuse de la région du Lac-Saint-Jean

Par Xavier Plante

B.Sc (Biologie)

Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi

Comme exigence partielle de la maîtrise en ressources renouvelables

Québec, Canada

Août, 2018

RÉSUMÉ

Le phénomène de la diminution des fermes laitières au profit des fermes céréalières observé au Saguenay-Lac-Saint-Jean (SLSJ) et ailleurs au Québec engendre des changements importants concernant la rotation des cultures, le travail du sol et la fertilisation des sols et des cultures. Toutefois, la rotation, le travail du sol et la fertilisation sont toutes des pratiques qui peuvent avoir des impacts importants sur les processus de recyclage et de décomposition de la matière organique (DMO) du sol tels que la minéralisation brute de l'azote (MBN) et la décomposition de la litière (DL). En ce sens, la MBN constitue la capacité des microorganismes du sol à minéraliser l'azote (N) organique en N minéral, alors que la DL représente l'habileté de la biologie du sol (de la mésofaune, à la microfaune, jusqu'à la microflore) à décomposer les résidus de cultures. Jusqu'ici aucune étude issue du SLSJ n'avait encore abordé l'impact à long terme de ces pratiques agricoles sur la DMO. L'objectif principal de l'étude était donc de déterminer la meilleure combinaison de pratique agricole à employer dans le contexte régional du SLSJ pour promouvoir, sur le long terme, la MBN et la DL dans une argile limoneuse.

Un dispositif de recherche instauré en 1989 à la ferme de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) de Normandin a été échantillonné en 2015 et 2016. Le dispositif expérimental utilisé comporte trois facteurs soit : deux rotations [une céréale en continu (CC) soit de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) et une céréale grainée (CG), soit une année d'orge suivie de deux années de trèfle rouge (*Trifolium pratense* L.) et de dactyle (*Dactylis glomerata* L. 'Okay')]; deux travaux du sol (chisel et charrue à versoir); et deux fertilisants [lisier de bovin (organique) et engrais minéral de synthèse]. La MBN a été déterminée à l'aide de la technique de dilution isotopique de l'azote-15 (^{15}N) et la DL à l'aide de la technique des sacs de litière enfouis. Nos résultats démontrent une augmentation de la MBN et de la DL lorsque la céréale est cultivée en rotation (CG) plutôt qu'en continu (CC). Le même constat est observé avec la fertilisation à base de lisier de bovin comparativement à la fertilisation minérale. Ces traitements (CG et fertilisation organique) favorisent l'apport en nutriment au sol par l'ajout de la matière organique labile qui favorise l'activité des microorganismes dans le sol. Pour ce qui est des travaux de sol, ceux-ci ne présentent pas de différences majeures par rapport à la MBN et à la DL. L'utilisation du chisel pourrait toutefois représenter une option intéressante pour les agriculteurs de la région puisque son utilisation permet potentiellement de diminuer la profondeur de travail du sol et ainsi augmenter

les vitesses de passage. Les résultats de ce projet de maîtrise permettent donc de conclure qu'il est préférable de cultiver les céréales sur une argile limoneuse de la région du SLSJ en rotation avec des plantes fourragères tout en utilisant une fertilisation d'origine organique.

AVANT-PROPOS

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre du programme de maîtrise en ressources renouvelables de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). Mon directeur de maîtrise était M. Maxime Paré de l'UQAC et mes codirecteurs étaient M. Jean Lafond d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) et M. Robert Bradley de l'Université de Sherbrooke. Le projet porte sur l'impact des pratiques agricoles sur la décomposition de la matière organique (DMO) dans un sol en grandes cultures nordiques dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (SLSJ). Ce sont ici deux variables réponses étroitement liées qui ont été évaluées dans le même dispositif expérimental, soit la minéralisation brute de l'azote (MBN) et la décomposition de la litière (DL). De ce fait, ces deux variables sont abordées conjointement tout au long de ce document. Ainsi, les conclusions de cette recherche considèrent les résultats issus des variables réponses comme étant équivalents.

Tout au long de cette maîtrise, les résultats engendrés par la présente étude ont été partagés oralement en dehors de l'UQAC à plusieurs reprises dans la province du Québec. Ce fut le cas lors des rencontres annuelles de l'Association Québécoise de Spécialistes en Sciences du Sol (AQSSS) qui ont eu lieu dans la ville de Québec en mai 2016 et dans la ville de Trois-Rivières en mai 2017. Également, en novembre 2017 il a été possible pour moi de présenter mes résultats devant le Groupe Multiconseil Agricole (GMA) Saguenay-Lac-Saint-Jean dans la ville d'Alma. Ce projet de maîtrise a été réalisé et financé grâce aux Fonds de développement offerts par la Fondation de l'UQAC et les Fonds de recherches du Québec sur la nature et les technologies (FRQNT) en partenariat avec le Fonds de recherche agroalimentaire axé sur l'agriculture nordique du Saguenay-Lac-Saint-Jean (FRAN-02). Également, ce projet n'aurait pas été possible sans une collaboration étroite avec la Ferme de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) à Normandin, Québec, Canada. Le projet a ainsi eu lieu dans les meilleures conditions possible et avec un soutien de qualité tout au long de ma maîtrise.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
AVANT-PROPOS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES ANNEXES.....	xi
LISTE DES SIGLES ET DES ABBRÉVIATIONS	xii
1. INTRODUCTION.....	1
2. HYPOTHÈSES	4
3. MÉTHODOLOGIE.....	5
3.1 DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE.....	5
3.2 PLAN EXPÉRIMENTAL	5
3.3 FACTEUR ROTATION DE CULTURE.....	6
3.4 FACTEUR TRAVAIL DU SOL	7
3.5 FACTEUR FERTILISATION	7
3.6 ÉCHANTILLONNAGES DES PARCELLES.....	8
3.6.1 MINÉRALISATION BRUTE DE L'AZOTE	8
3.6.2 DÉCOMPOSITION DE LA LITIÈRE	10
3.7 ANALYSES STATISTIQUES.....	13
4. RÉSULTATS	13
4.1 LA MINÉRALISATION BRUTE DE L'AZOTE	13
4.2 LA DÉCOMPOSITION DE LA LITIÈRE	16
4.2.1 PAILLE DÉCOMPOSÉE	16
4.2.2 CARBONE DÉCOMPOSÉ DE LA PAILLE	19
4.2.3 AZOTE DÉCOMPOSÉ DE LA PAILLE	22
5. DISCUSSION	28
5.1 FACTEUR ROTATION DE CULTURE.....	28
5.2 FACTEUR TRAVAIL DU SOL	29
5.3 FACTEUR FERTILISATION	31

5.4 FACTEUR TEMPS	32
5.5 LES BÉNÉFICES DE LA DMO	34
6. CONCLUSION	34
RÉFÉRENCES	36
ANNEXE A – TABLEAUX D’ANOVA	41
ANNEXE B – FIGURES DE MÉTÉO À NORMANDIN	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Date d'implantation et de récupération des sachets durant l'expérience.....	11
Tableau 2. Analyse de la variance de la minéralisation brute de l'azote ($\text{mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$) dans une argile limoneuse (Gleysol humique) pour l'année 2015, 2016 et 2015 + 2016 pour les facteurs rotation de culture, travail du sol, fertilisation et date d'échantillonnages.....	41
Tableau 3. Analyse de la variance de la paille décomposée dans une argile limoneuse (Gleysol humique) pour l'année 2015, 2016 et 2015 + 2016 pour les facteurs rotation de culture, travail du sol, fertilisation et date d'échantillonnages.....	42
Tableau 4. Analyse de la variance de la masse de carbone décomposée de la paille dans une argile limoneuse (Gleysol humique) pour l'année 2015, 2016 et 2015 + 2016 pour les facteurs rotation de culture, travail du sol, fertilisation et date d'échantillonnages.....	43
Tableau 5. Analyse de la variance de la masse d'azote décomposée de la paille dans une argile limoneuse (Gleysol humique) pour l'année 2015, 2016 et 2015 + 2016 pour les facteurs rotation de culture, travail du sol, fertilisation et date d'échantillonnages.....	44

LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Facteurs, combinaisons de pratiques agricoles, blocs et dates d'échantillonnages.....6
- Figure 2. Taux de MBN ($\text{mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$) en fonction de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)], du travail du sol (chisel et charrue) et de la fertilisation (organique et minérale) pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016 combinées. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$14
- Figure 3. Taux de MBN ($\text{mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$) en fonction de la date d'échantillonnages pour les mois de juin et de juillet de 2015 et 2016 ainsi que pour l'année 2015 et 2016 pris individuellement. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les dates de récupération à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$15
- Figure 4. Taux de MBN ($\text{mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$) en fonction de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)] et du travail du sol (chisel et charrue) pour l'année 2015. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$15
- Figure 5. Paille décomposée (%) en fonction de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)], du travail du sol (chisel et charrue) et de la fertilisation (organique et minérale) pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$17
- Figure 6. Paille décomposée (%) en fonction de la date de récupération des échantillons pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les dates à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$18

Figure 7. Paille décomposée (%) en fonction de la date de récupération des échantillons et de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)] pour l'année 2015. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements et les dates à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$19

Figure 8. C décomposé de la paille (%) en fonction de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)], du travail du sol (chisel et charrue) et de la fertilisation (organique et minérale) pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$20

Figure 9. C décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les dates de récupération à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$21

Figure 10. C décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons et de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)] pour l'année 2015. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements et les dates à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$22

Figure 11. N décomposé de la paille (%) en fonction de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)], du travail du sol (chisel et charrue) et de la fertilisation (organique et minérale) pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements lorsque celle-ci à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$24

Figure 12. N décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les dates lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$25

Figure 13. N décomposé de la paille (%) en fonction du travail du sol (chisel et charrue) et de la fertilisation (organique et minérale) pour l'année 2015. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$26

Figure 14. N décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons et de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)] pour l'année 2015. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements et les dates lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$26

Figure 15. N décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons et de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)] pour l'année 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements et les dates lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$27

Figure 16. N décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons et de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)] pour l'année 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements et les dates lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$27

Figure 17. N décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons et du travail du sol (chisel et charrue) pour l'année 2015. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements et les dates lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$28

Figure 18. Précipitations à la Ferme de recherche de Normandin en 2015, 2016 et la moyenne des années de 1993 à 2017 pour les mois de juin et de juillet (Environnement-Canada 2017).....45

Figure 19. Température moyenne à la Ferme expérimentale de Normandin en 2015, 2016 et la moyenne des années entre 1993 à 2017 pour les mois de juin et de juillet (Environnement-Canada 2017).....45

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – TABLEAUX D’ANOVA.....	41
ANNEXE B – FIGURES DE MÉTÉO À NORMANDIN.....	45

LISTE DES SIGLES ET DES ABBRÉVIATIONS

AAC : Agriculture et Agroalimentaire Canada
 ANOVA : Analyse de la variance
 DL : Décomposition de la Litière
 DMO : Décomposition de la Matière Organique
 FAO : *Food and Agriculture Organization of the United Nations*
 log : Logarithme
 MAPAQ : Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
 MBN : Minéralisation Brute de l'N
 MO : Matière Organique
 SLSJ : Saguenay-Lac-Saint-Jean
 UQAC : Université du Québec à Chicoutimi

Symboles chimiques :

C : Carbone	NH ₃ : Ammoniac
CaH ₄ P ₂ O ₈ : Phosphate monocalcique	NH ₄ ⁺ : Ammonium
H ₂ SO ₄ : Acide sulfurique	NH ₄ NO ₃ : Nitrate d'ammonium
KCl : Chlorure de potassium	(NH ₄) ₂ SO ₄ : Sulfate d'ammonium
K ₂ O : Oxyde de potassium	NO ₃ ⁻ : Nitrate
MgO : Oxyde de magnésium	O ₂ : Dioxygène
N : Azote	P ₂ O ₅ : Pentoxyde de phosphate
¹⁴ N : Azote isotopique 14	S : Soufre
¹⁵ N : Azote isotopique 15	

Unité de mesure :

% : Pourcentage	ha : Hectare	M : Molaire
°C : Degré Celsius	j : Jour	mg : Milligramme
μL : Microlitre	kg : Kilogramme	min : Minute
cm : Centimètre	L : Litre	mL : Millilitre
cm ² : Centimètre carré	m : Mètre	mm : Millimètre
g : Gramme	m ² : Mètre carré	
h : Heure	m ³ : Mètre cube	

Facteurs utilisés dans l'expérience :

RC : Rotation de culture	FT : Fertilisation
TS : Travail du sol	DT : Date de récolte des échantillons

Traitements utilisés dans l'expérience :

CC : Céréales en Continu	F1 : Première année de culture en Fourrage
CG : Céréales Grainées (en alternance avec F1 et F2)	F2 : Deuxième année de culture en Fourrage

1. INTRODUCTION

L'agriculture au Saguenay-Lac-Saint-Jean (SLSJ) représente l'un des principaux moteurs économiques de la région, et ce, depuis sa fondation (Côté 2006). En 2010, environ un huitième des emplois de la région étaient rattachés aux domaines agroalimentaires (MAPAQ 2014). La région se situe près de la limite septentrionale de l'agriculture au Québec et de ce fait, les producteurs du SLSJ se sont spécialisés dans une agriculture dite « nordique » (MAPAQ 2014). Les secteurs de production laitière et des grandes cultures annuelles nordiques représentent la plus grande proportion de l'agriculture régionale et ainsi une source de revenus importante et relativement constante pour la région (MAPAQ 2014).

Au SLSJ, les cultures annuelles telles que l'orge et le canola ont pris de l'ampleur lors des dernières décennies par rapport aux cultures pérennes telles que le trèfle et la luzerne (Tabi *et al.* 1990; MAPAQ 2014). Ce changement est notamment causé par la baisse du nombre de fermes laitières dans la région, soit une diminution de 15,5 % entre les années 2004 et 2010, bien que l'industrie laitière demeure encore aujourd'hui un secteur agroalimentaire important de la région (MAPAQ 2014). En effet, au Québec comme ailleurs au Canada, l'abandon de la production laitière se traduit souvent par une substitution des superficies consacrées aux cultures pérennes (fourrages et pâturages) par des cultures céréalières annuelles plus rentables (Tabi *et al.* 1990; MAPAQ 2014; Phelan *et al.* 2015). Entre 1986 et 2010 au SLSJ, on constate ainsi une augmentation d'environ 49 % de terres allouées aux cultures annuelles alors que les cultures pérennes ont régressé de 31 % durant cette même période (Tabi *et al.* 1990; MAPAQ 2014). Ainsi, la popularité croissante des cultures annuelles céréalières combinée à l'abandon progressif des cultures pérennes dans le système de rotation des producteurs de la région risque de nuire aux rendements des cultures sur le long terme, notamment en causant une détérioration des sols et une augmentation de l'occurrence des maladies (Van Eerd *et al.* 2014).

Les changements apportés aux systèmes de rotation des cultures ne sont pas les seules répercussions occasionnées par la baisse du nombre de fermes laitières dans la région. En effet, avec la diminution du nombre de fermes laitières dans la région du SLSJ, moins de lisiers et de fumiers sont disponibles pour combler les besoins en fertilisation des cultures (MAPAQ 2014). Ainsi, davantage d'engrais de synthèse sont utilisés pour combler les besoins en nutriments des

cultures annuelles (MAPAQ 2014). Les effets bénéfiques de l'utilisation des engrais organiques (versus engrais minéraux) sur la biologie du sol sont multiples. Par exemple, il a été démontré que les applications de fumier, comparativement aux engrais minéraux, amélioreraient différentes propriétés biologiques du sol dont la biomasse et la respiration microbienne (N'Dayegamiye *et al.* 1997). La minéralisation brute de l'N (MBN) (Habteselassie *et al.* 2006; N'Dayegamiye 2009) et la décomposition de la litière (DL) (Diacono et Montemurro 2010) sont d'autres propriétés biologiques également améliorées par l'utilisation des engrais organiques. La MBN constitue la capacité des microorganismes du sol à minéraliser l'N organique en N minéral (Davidson *et al.* 1991), alors que la DL représente simplement un indice général de la biologie du sol (de la microflore à la macrofaune) à décomposer la litière et/ou les résidus de cultures (Beyaert et Fox 2008).

La montée en popularité des cultures annuelles céréalières dans la région du SLSJ accentue également la fréquence des travaux de sol nécessaires tels que l'utilisation de la charrue à versoir (MAPAQ 2014). L'augmentation de la fréquence des travaux de sol combinée à l'augmentation de leur intensité provoque une détérioration de la qualité des sols utilisés. En effet, le sol est susceptible d'être détérioré par les emplois trop fréquents et trop intenses des travaux de sol via notamment une augmentation de leur compaction (Warkentin 2001). Cette compaction peut s'avérer très néfaste pour les processus biologiques s'opérant dans le sol puisque cela diminue la proportion d'O₂ dans l'air du sol, phénomène causé par un manque d'espace libre et/ou une proportion accrue en eau dans les pores du sol (Balesdent *et al.* 2000). La raréfaction de l'O₂ dans le sol inhibe alors les processus importants de la décomposition de la matière organique (DMO) tels que la MBN et la DL (Balesdent *et al.* 2000). Toutefois, il a été démontré que les travaux de sol conventionnels utilisés fréquemment diminuaient la compaction dans les 10 premiers cm de sol, alors que ces mêmes travaux accentuaient la compaction du sol dans les couches sous-jacentes (Jabro *et al.* 2009). Ainsi, les travaux de sol conventionnels remettent en circulation la matière organique (MO) dans les premiers cm de sol et peuvent donc améliorer la DMO en surface alors que celle-ci est grandement diminuée en profondeur, car les conditions y sont moins favorables (Francis *et al.* 1992; Cookson *et al.* 2008). Il est néanmoins connu que l'augmentation de l'intensité des travaux de sol augmente la susceptibilité des sols aux phénomènes d'érosions hydriques et

éoliennes en surface (Mendez et Buschiazzo 2010). Ainsi, les augmentations de la fréquence des travaux de sol et des cultures annuelles, bien qu'étant des alternatives économiquement avantageuses sur le court terme, risquent de diminuer la qualité des sols (Warkentin 2001) et de nuire la rentabilité des entreprises à long terme.

En milieux agricoles, les processus biologiques comme la MBN et la DL jouent un rôle très important dans la gestion durable de la fertilisation des cultures. En effet, l'N est un élément limitant à la croissance des plantes (Fang *et al.* 2007) et la qualité du sol est entre autres proportionnelle à la capacité des microorganismes du sol d'accomplir la MBN afin de fournir aux cultures cet important nutriment (Sbih *et al.* 2003). Ainsi, ce sont les microorganismes du sol et leur capacité à convertir l'N organique en N minéral assimilable par les plantes qu'il est important de favoriser afin d'éventuellement pouvoir réduire les applications en fertilisants (Fang *et al.* 2007). Pour sa part, la DL est un processus tout aussi important puisqu'elle permet de remettre en circulation des nutriments immobilisés dans les résidus organiques (litière) du sol (Diacono et Montemurro 2010).

Dans un milieu froid et humide comme celui du SLSJ, les sols de mauvaises qualités (ex. : compaction, faibles porosités, etc.), accumulent des quantités excessives de MO en raison de leur faible DMO (MAPAQ 2014). La qualité de ces sols peut toutefois être modifiée en fonction des pratiques agricoles employées (Fageria 2012). C'est pourquoi il est nécessaire d'étudier les effets combinés des différentes pratiques agricoles telles que la rotation des cultures, le travail du sol et la fertilisation sur les processus biologiques du sol dont ceux responsables de la remise en circulation des nutriments utiles à la croissance des plantes (Paré et Bedard-Haughn 2013; MAPAQ 2014). Une étude menée au SLSJ a récemment démontré les effets bénéfiques sur les rendements d'orge d'inclure à la fois une prairie dans la rotation et l'utilisation d'un engrais organique (lisier de bovin) pour la fertilisation des cultures (Lafond *et al.* 2017). Cet effet bénéfique serait dû à l'accumulation de nutriments azotés dans le sol à la suite de l'emploi d'un engrais organique et de l'enfouissement de la prairie (Lafond *et al.* 2017). Toutefois, le mécanisme exact menant à l'augmentation des rendements reste encore à approfondir. À l'aide du même dispositif expérimental, Maillard *et al.* (2016) a déterminé que le carbone (C) organique du sol s'accumulait davantage lorsque du lisier de bovin était appliqué dans des parcelles avec l'orge sous rotation avec

une prairie versus la monoculture d'orge. Ce résultat pourrait être dû à la fréquence moins élevée des travaux de sols (annuellement versus aux trois ans) ou bien à la stabilisation des stocks de C par l'apport en MO labile issu des plantes fourragères (Maillard *et al.* 2016). Il est ainsi important de mieux comprendre les processus de DMO.

L'objectif principal de la présente étude est de déterminer la meilleure combinaison de pratiques agricoles à employer dans le contexte régional du SLSJ pour promouvoir la DMO du sol, soit la MBN et la DL. L'objectif spécifique est d'évaluer les impacts de la rotation des cultures, du travail du sol et de la fertilisation sur la MBN et la DL sur une argile limoneuse Normandin (Gleysol humique) soumis à ces différentes pratiques depuis près de trois décennies.

2. HYPOTHÈSES

La présente étude comporte un total de six hypothèses, soit deux variables réponses mesurées et trois facteurs à l'étude.

A) La MBN en fonction de la rotation de culture.

H₀ : La MBN ne sera pas influencée par de la rotation de culture.

H₁ : La MBN sera supérieure dans un système de rotation versus en monoculture.

B) La MBN en fonction du travail de sol.

H₀ : La MBN ne sera pas influencée par le travail de sol.

H₁ : La MBN sera supérieure avec un travail du sol charrue à versoir versus le chisel.

C) La MBN en fonction de la fertilisation.

H₀ : La MBN ne sera pas influencée par la fertilisation.

H₁ : La MBN sera supérieure avec une fertilisation organique versus une fertilisation minérale.

D) La DL en fonction de la rotation de culture.

H₀ : La DL ne sera pas influencée par la rotation de culture.

H₁ : La DL sera supérieure dans un système de rotation versus en monoculture.

E) La DL en fonction du travail du sol.

H₀ : La DL ne sera pas influencée par le travail de sol.

H₁ : La DL sera supérieure avec un travail du sol charrue à versoir versus le chisel.

F) La DL en fonction de la fertilisation.

H₀ : La DL ne sera pas influencée par la fertilisation.

H₁ : La DL sera supérieure avec une fertilisation organique versus une fertilisation minérale.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

Cette étude a débuté à l'automne 1989 à la Ferme de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) à Normandin, Québec, Canada, (48°50'N, 72°33'W) dans la région du SLSJ. L'expérience est réalisée sur une argile limoneuse des séries Labarre et Normandin (Gleysol humique) (Raymond *et al.* 1965). La couche 0-15 cm est composée à 49 % d'argile, 43 % de limon et 8 % de sable (Bissonnette *et al.* 2001). La région est caractérisée par un climat continental froid et humide. De 1993 à 2017, la température moyenne de mai à octobre était de 12,5 °C et la précipitation moyenne totale pour cette même période était de 489 mm (262-654 mm) (Environnement-Canada 2017).

3.2 PLAN EXPÉRIMENTAL

Le dispositif expérimental de la présente étude est un dispositif en tiroirs instauré depuis 1989 où le plus petit des trois niveaux (sous-sous parcelles) possède une superficie de 50 m² (5 par 10 m). Le facteur principal est la rotation des cultures, le facteur secondaire est le travail du sol et le troisième facteur est la fertilisation (figure 1). Tous les facteurs sont présents en même temps sur le dispositif. Il s'agit de deux traitements pour le facteur rotation de culture (les phases de rotations sont présentes à chaque année pour la céréale grainée qui est suivie de deux années de fourrage) et de deux traitements pour le facteur travail du sol ainsi que pour le facteur fertilisation [$2 \times 2 \times 2 =$

8 parcelles différentes + 8 parcelles de fourrages (première et deuxième année de fourrages) = 16 parcelles]. Les traitements expérimentaux sont répétés sur quatre blocs aléatoires (16 traitements × 4 répétitions = 64 parcelles au total).

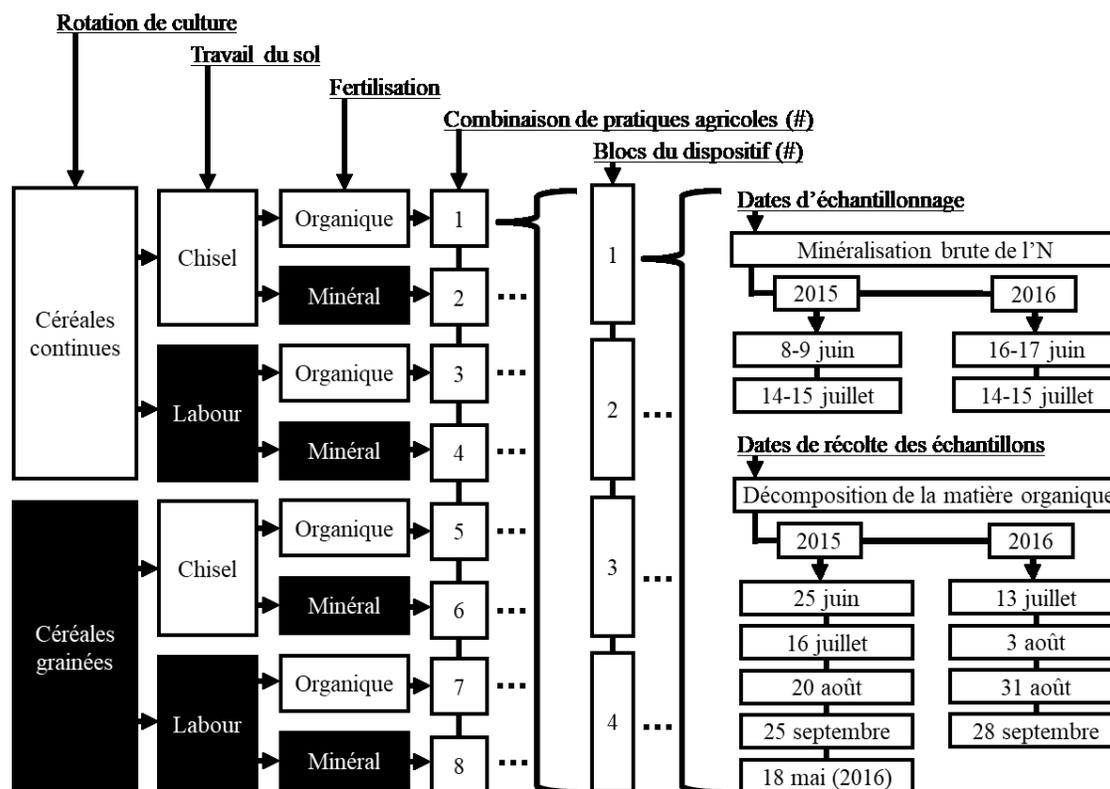


Figure 1. Facteurs, combinaisons de pratiques agricoles, blocs et dates d'échantillonnages.

3.3 FACTEUR ROTATION DE CULTURE

Le facteur rotation de culture comprend deux types de rotation : culture de céréales en continu (CC) et culture de céréales grainées (CG) suivie de deux années de prairie [prairie 1^{er} année (F1) et prairie 2^e année (F2)]. La céréale utilisée était l'orge de printemps (*Hordeum vulgare* L. 'Chapais'). Le travail du sol (voir section 3.4 Facteur travail du sol) a permis d'incorporer dans le sol la paille d'orge. Dans le cas des parcelles cultivées en CG, une première année de culture comprenait le semis de l'orge en plante abri avec un mélange de plantes fourragères vivaces. Toutefois, il y avait une absence de travaux de sol après la récolte d'orge. Ainsi, les plantes fourragères étaient cultivées et récoltées dans les mêmes parcelles lors de la première année de

culture en fourrage (F1) et de la seconde année de culture en fourrage (F2). À la fin de cette rotation de trois ans, le travail du sol était effectué et un nouveau cycle de trois ans avait lieu. Les trois phases de la rotation orge-plantes vivaces (CG, F1 et F2) étaient présentes à chaque année. Ainsi, il était possible de retrouver à chaque année des parcelles présentant les quatre différents traitements inclus dans la rotation de culture, soient CC, CG, F1 et F2.

De 1990 à 2016, les taux de semis de l'orge étaient de 170 kg ha^{-1} pour les parcelles cultivées en CC et de 128 kg ha^{-1} pour les parcelles cultivées en CG. Dans les parcelles en CG, un mélange de plantes fourragères était immédiatement semé après l'orge. De 1990 à 1999, les fourrages ensemencés incluaient de la fléole des prés (*Phleum pratense* L. 'Champ') et du trèfle rouge (*Trifolium pratense* L. 'Prosper'). Le taux de semis des plantes fourragères mélangées était de 10 kg ha^{-1} . De 2000 à 2017, la fléole des prés a été remplacée par le dactyle (*Dactylis glomerata* L. 'Okay') et le taux de semis a été augmenté à 14 kg ha^{-1} .

3.4 FACTEUR TRAVAIL DU SOL

Le second facteur de travail du sol comparait deux instruments de travail du sol, soit : le chisel et la charrue à versoir. La couche de sol travaillée par le chisel était de 0 à 15 cm de profondeur, alors que la charrue travaillait la couche de sol De 0 à 20 cm. Ces travaux primaires du sol étaient effectués à chaque automne pour la céréale en continu (CC) et à l'automne de la troisième année (F2) pour la céréale en rotation (CG).

3.5 FACTEUR FERTILISATION

Le troisième facteur comprenait deux types de fertilisation, soit : l'engrais minéral et l'engrais organique (lisier de bovin). Le lisier et l'engrais minéral étaient appliqués en surface, avant le semis de l'orge. Un seul passage de herse à dents permettait ensuite d'incorporer les engrais dans le sol (jusqu'à 5 cm) et permettait ainsi de préparer le lit de semence. Les parcelles en fourrage (F1 et F2) ne subissaient pas cette incorporation, bien qu'elles aient reçu également de l'engrais minéral et organique. La fertilisation avec le traitement minéral des parcelles cultivées en orge était de 70 kg N ha^{-1} sous forme de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3), de 40 kg ha^{-1} de pentoxyde de phosphate (P_2O_5) sous forme de superphosphate triple ($\text{CaH}_4\text{P}_2\text{O}_8$) et de 74 kg ha^{-1} d'oxyde de potassium

(K₂O) sous forme de chlorure de potassium (KCl). Dans le cas des parcelles en F1 et F2, la fertilisation minérale était de 74 kg N ha⁻¹ de NH₄NO₃ (variant de 65 à 80 kg total d’N ha⁻¹), de 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ et de 140 kg ha⁻¹ de K₂O. La seconde application de NH₄NO₃ après la première coupe des fourrages était en moyenne de 46 kg N ha⁻¹ (variant de 65 à 80 kg total d’N ha⁻¹). L’engrais organique, soit le lisier de bovin, était obtenu auprès d’une ferme laitière de la région. Le lisier frais était épandu à un taux de 50 m³ ha⁻¹ dans toutes les parcelles et 30 m³ ha⁻¹ était appliqué dans les parcelles F1 et F2 après la première coupe du fourrage de 1996 à 2009 (30 m³ ha⁻¹ était également appliqué en 2000 suite à une seconde coupe du fourrage). Dans les parcelles avec de l’orge, le lisier procurait en moyenne 103 kg N total ha⁻¹ an⁻¹ (variant de 73 à 153 kg N total ha⁻¹ an⁻¹). Alors que dans les parcelles en F1 et F2, le lisier procurait en moyenne 153 kg N total ha⁻¹ an⁻¹ (variant de 73 à 242 kg N total ha⁻¹ an⁻¹) (Lafond *et al.* 2017).

3.6 ÉCHANTILLONNAGES DES PARCELLES

Deux types de mesure ont été effectués afin de mesurer la minéralisation *in-situ* (c.-à-d. sur le site en conditions réelles) de la MO : la MBN et la DL. Pour cette étude, seulement les parcelles en phases « céréale » (CC et CG) ont été échantillonnées (n = 32) (figure 1).

3.6.1 MINÉRALISATION BRUTE DE L’AZOTE

La technique de dilution isotopique décrite par Davidson *et al.* (1991) et Hart *et al.* (1994) a été utilisée afin de mesurer la MBN. Quatre périodes d’échantillonnage couvrant deux années ont été réalisées soit : le 8-9 juin 2015, 14-15 juillet 2015, 16-17 juin 2016 et le 14-15 juillet 2016. L’orge, à chacune de ces périodes d’échantillonnage, était selon l’échelle Zadok (Larsen et Smith 2015) de : Z12 (tallage), Z34 (élongation de la tige), Z14 (tallage) et Z43 (gonflement), respectivement. À chacune de ces périodes, le sol a été prélevé dans des cylindres de plastiques de 5 cm de diamètre sur une profondeur de 5-15 cm à l’aide d’un marteau à coulisse. Pour chacune des parcelles échantillonnées, deux cylindres de sol ont été prélevés, pour un total de 64 cylindres par période d’échantillonnage. Ces cylindres de sol étaient ensuite tous injectés uniformément à l’aide d’une aiguille à ouverture latérale de type *side-port* (15 cm de long, Cadence Science®, Cranston, Rhode Island, États-Unis) 7 fois 1,4 mL par injection (9,8 mL au total) d’une solution contenant de l’N

isotopique ^{15}N (30 mg L^{-1} de sulfate d'ammonium $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ 99 % d'atome ^{15}N). Les cylindres ont été par la suite refermés à chacune de leurs extrémités à l'aide de capsule de plastique. Par la suite, la moitié des cylindres ont été incubés pendant 15 min à l'ombre alors que l'autre moitié des cylindres était incubée *in situ* dans le sol pendant 24 h à une profondeur de 5-15 cm (dans les trous laissés par l'échantillonnage). Après l'incubation (soit 15 min ou 24 h), chacun des cylindres a été vidé et le sol contenu à l'intérieur a été homogénéisé manuellement dans un sac de plastique. Un sous échantillon de sol (~10 g) a servi pour déterminer la teneur en eau gravimétrique du sol en utilisant la technique de Topp *et al.* (2008) (105 °C pendant 24 h). Un autre sous échantillon de sol (~25 g) a été ensuite ajouté à une solution de KCl 2 M (100 mL) afin d'arrêter les processus biogéochimiques s'y déroulant et afin d'en extraire l'N minéral du sol incubé. Les extraits de sol ont été mélangés pendant 30 min à 1 tour par seconde puis filtrés à l'aide d'un papier Whatman® #1. Une partie de ce filtrat a été analysée par colorimétrie à la Ferme de recherche d'AAC à Normandin, Québec, Canada pour déterminer les concentrations en ammonium (N-NH_4^+) (*Lachat Instruments, Quickchem*® méthode 12-107-06-2-A). Dans un second temps, le filtrat a été analysé pour en connaître le ratio isotopique de l'ammonium. Pour ce faire, un disque de papier Whatman® #3 était d'abord sectionné en petits disques (6 mm de diamètre). Chacun des disques fut alors imbibés de 10 μL d'acide sulfurique (H_2SO_4) et scellés entre deux rubans de téflon. Ce ruban de téflon était ensuite inséré dans une bouteille Nalgene™ contenant 30 mL de filtrat. De l'oxyde de magnésium (MgO) était alors ajouté (~0,2 g) dans la bouteille pour rendre la solution basique et ainsi transformer l'ammonium en ammoniaque gazeux. Le disque acidifié présent dans le ruban de téflon recueillait alors l'ammoniaque gazeuse. C'est pourquoi la bouteille était directement refermée après l'ajout du MgO . Le contenu de la bouteille était brassé pendant 7 j (jour) puis le ruban de téflon était retiré de la bouteille puis séché à l'étuve à 50 °C pendant 1 h. Chacun des disques était ensuite emballé dans une capsule d'étain pour les analyses isotopiques. Les analyses isotopiques ont été réalisées à l'Université de la Saskatchewan. Pour résumer, le ratio ($^{15}\text{N-NH}_4^+ / ^{14}\text{N-NH}_4^+$) diminuait au fur et à mesure que les microorganismes du sol minéralisaient du ^{14}N -organique (il y a très peu de ^{15}N -organique naturellement dans le sol) en ^{14}N -minéral. Les taux de MBN (en mg $\text{N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$) étaient calculés à l'aide de la formule proposée par Hart *et al.* (1994) (équation 1).

$$\text{Taux de MBN} = \frac{[\text{N-NH}_4^+]_0 - [\text{N-NH}_4^+]_t}{t} \times \frac{\log(\text{APE}_0/\text{APE}_t)}{\log([\text{N-NH}_4^+]_0/[\text{N-NH}_4^+]_t)} \quad (1)$$

t = temps en jour(s)

$[\text{N-NH}_4^+]_0$ = concentration totale d' N-NH_4^+ (mg kg^{-1}) au temps 0

$[\text{N-NH}_4^+]_t$ = concentration totale d' N-NH_4^+ (mg kg^{-1}) au temps t

APE_0 = % d'atome d' ^{15}N en excès du *pool* N-NH_4^+ au temps 0

APE_t = % d'atome d' ^{15}N en excès du *pool* N-NH_4^+ au temps t

3.6.2 DÉCOMPOSITION DE LA LITIÈRE

La méthode des sachets de litière (« *litter bag* ») a été utilisée afin de mesurer la DL (Beyaert et Fox 2008). Pour résumer, cette méthode permet d'évaluer la perte de masse à la suite d'une incubation d'un échantillon de litière préalablement pesé. Pour ce faire, les échantillons de litière étaient insérés dans le sol, puis récupérés après différents intervalles de temps afin de mesurer la perte de masse (décomposition) effectuée par les organismes du sol. Les sachets de litière (11 x 11 cm) étaient confectionnés à partir d'une moustiquaire en fibre de verre dont la dimension des mailles était de 1 mm. La litière utilisée était de la paille d'orge sèche de 5 à 10 cm de longueur. La quantité de paille insérée dans les sachets a été déterminée selon la masse moyenne de paille d'orge produite par unité de surface à Normandin de 2003 à 2015, soit de $2\,253 \text{ kg ha}^{-1}$. En rapportant cette quantité à la surface d'un des sachets ($\sim 100 \text{ cm}^2$), il était possible de déterminer que ceux-ci devaient contenir 2,25 g de paille d'orge (initiale non sèche). Des étiquettes étaient reliées par un fil à chacun des sachets de litière afin de faciliter leur identification et leur récupération. Dans chacune des parcelles en CC et CG pour l'année 2015 et 2016, six sachets étaient enterrés en position horizontale à une profondeur de 5 à 10 cm. À la suite de quoi, ces sachets ont été récupérés à différentes dates (tableau 1). En 2015, la première série de sachets avait été récupérée le jour même de l'implantation afin de mesurer la perte de paille due à la manipulation des sachets (*traveller bags*) (tableau 1). En date du 31 août 2016, deux séries de sachets ont été récoltées de façon combinée (tableau 1). Une dernière série de sachets a été récoltée en mai 2017, mais n'a pas été mesurée en raison de l'arrivée tardive de ces données dans le cadre de la rédaction de ce mémoire (tableau 1). Il est à noter que tous les sachets ont été retirés le 25 septembre 2015

pour être ensuite réimplantés le 15 octobre 2015 afin de faciliter la réalisation du travail du sol automnal.

Tableau 1. Date d'implantation et de récupération des sachets durant l'expérience.

Année	Implantation des sachets	Récupération des sachets (série #)					
		1	2	3	4	5	6
2015	8 juin	8 juin ¹	25 juin	16 juill.	20 août	25 sept.	18 mai (2016)
2016	17 juin	13 juill.	3 août	31 août ²	31 août ²	28 sept.	∅

¹ *Traveller bag*

² Récolte combinée

Les échantillons de paille recueillis étaient ensuite lavés à l'eau non distillée sur un tamis dont les mailles étaient de 0,5 mm pour en retirer les particules de sol. La paille lavée était ensuite séchée à l'étuve à 55 °C pendant 24 h. L'échantillon était ensuite pesé de nouveau pour en obtenir la masse finale sèche. Il était néanmoins nécessaire d'ajuster la valeur de la masse mesurée. Tout d'abord, il fallait ajuster à la baisse la masse (g) de paille initiale non sèche en fonction du pourcentage moyen d'humidité (déterminée par séchage à l'étuve à 55 °C pendant 24 h) de celle-ci afin d'obtenir la masse de paille sèche initiale (équation 2). Suite à quoi il fallait ajuster la masse (g) de la paille finale en fonction de l'effet du transport et de la manipulation des sachets qui fut déterminé par la différence de masse des *traveller bags* avant et après leur insertion dans le sol (équation 3). Avec ces deux données ajustées, la masse de paille (g) sèche décomposée était déduite (équation 4). Par ailleurs, il est possible de convertir la quantité de paille décomposée en pourcentage (équation 5) pour obtenir une proportion de la DL représentative à l'échelle du champ. Par la suite, la paille a été analysée pour en connaître les teneurs en C et en N. Pour ce faire, les échantillons étaient préalablement broyés à 1 mm et séchés à 85 °C pendant 2 h avant d'être mesurés dans un analyseur de CNS de LECO®. Il a donc été possible de calculer le pourcentage de C (équation 6) et d'N (équation 7) décomposés de la paille à chacune des dates de récupération.

$$M_{i+s} = M_i \times [(100 - \% \text{ hum}) \div 100] \quad (2)$$

M_{i+s} = Masse de la paille sèche et initiale (g)

M_i = Masse de la paille humide initiale (g)

% hum = Pourcentage d'humidité moyen dans la paille initiale (%)

$$M_{f+s+tr} = M_{f+s} \times [(100 - \% tr) \div 100] \quad (3)$$

M_{f+s+tr} = Masse de la paille sèche finale et ajustée au transport (g)

M_{f+s} = Masse de la paille sèche finale (g)

% tr = Pourcentage de perte de masse moyenne due au transport (%)

$$M_d = M_{i+s} - M_{f+s+tr} \quad (4)$$

M_d = Masse exacte de paille sèche décomposée (g)

M_{i+s} = Masse de la paille sèche initiale (g)

M_{f+s+tr} = Masse de la paille sèche finale et ajustée au transport (g)

$$P_d = [(M_{i+s} - M_{f+s+tr}) \div M_{i+s}] \times 100 \quad (5)$$

P_d = Paille décomposée (%)

M_{i+s} = Masse de la paille sèche initiale (g)

M_{f+s+tr} = Masse de la paille sèche finale et ajustée au transport (g)

$$CP_d = [(\{M_{i+s} \times \% C\} - \{M_{f+s+tr} \times \% C\}) \div (M_{i+s} \times \% C)] \times 100 \quad (6)$$

CP_d = C décomposé de la paille (%)

M_{i+s} = Masse de la paille sèche initiale (g)

% C = Pourcentage de C de la paille (%)

M_{f+s+tr} = Masse de la paille sèche finale et ajustée au transport (g)

$$NP_d = [(\{M_{i+s} \times \% N\} - \{M_{f+s+tr} \times \% N\}) \div (M_{i+s} \times \% N)] \times 100 \quad (7)$$

NP_d = N décomposé de la paille (%)

M_{i+s} = Masse de la paille sèche initiale (g)

% N = Pourcentage de N de la paille (%)

M_{f+s+tr} = Masse de la paille sèche finale et ajustée au transport (g)

3.7 ANALYSES STATISTIQUES

L'analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée en utilisant un modèle en tiroir. Les facteurs fixes de l'étude étaient la rotation de culture (RC), le travail du sol (TS), la fertilisation (FT) et la date de récolte des échantillons (DT) alors que le facteur bloc était aléatoire. Le test *a posteriori* de Tukey a été utilisé pour les croisements de facteurs ayant présenté une différence significative avec l'ANOVA. Les DT ont été évalués pour l'année 2015 et 2016 de manière séparée et combinée (moyenne des deux années ensemble). Les variables à l'étude étaient la MBN ($\text{mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$), la proportion de paille décomposée (%), la proportion de C décomposé de la paille (%) et la proportion d'N décomposé de la paille (%). La normalité et l'homogénéité de la variance ont été évaluées au préalable à l'aide du test de Shapiro-Wilks et par une analyse de la distribution des données, de leur homogénéité et de leurs résidus. Les données de MBN étaient normalisées par une transformation racine cubique alors que les données de décomposition de la litière étaient normalisées par un $\log_{10}(x+50)$. Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R, version 3.3.2.

4. RÉSULTATS

Les résultats des tests statistiques (ANOVAs complètes) sont présentés à l'annexe A.

4.1 LA MINÉRALISATION BRUTE DE L'AZOTE

Les taux de MBN ont été supérieurs dans les parcelles en CG plutôt qu'en CC, soit une différence entre les moyennes de $5 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$ pour l'ensemble des années (figure 2). Les travaux de sol n'ont pas présenté un taux moyen de MBN significativement différent (figure 2). La fertilisation organique présente un taux moyen de MBN supérieur de $4 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$ par rapport au traitement minéral pour l'ensemble des années (figure 2). En 2015, les taux moyens de MBN ont été supérieurs de $8 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$ lors du mois de juillet par rapport au mois de juin (figure 3). Pour 2016 et pour les années combinées 2015 + 2016, il n'y avait pas de différence entre les mois (figure 3). Pour l'année 2015, la combinaison de traitement CG-charrue a présenté un taux moyen de MBN significativement supérieur de $8 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$ par rapport aux traitements CC-chisel et CC-charrue, respectivement (figure 4). Par ailleurs, le taux

moyen de MBN n'a pas été significativement différent entre les traitements CC-chisel, CC-charrue et CG-chisel ainsi qu'entre les traitements CG-chisel et CG-charrue (figure 4).

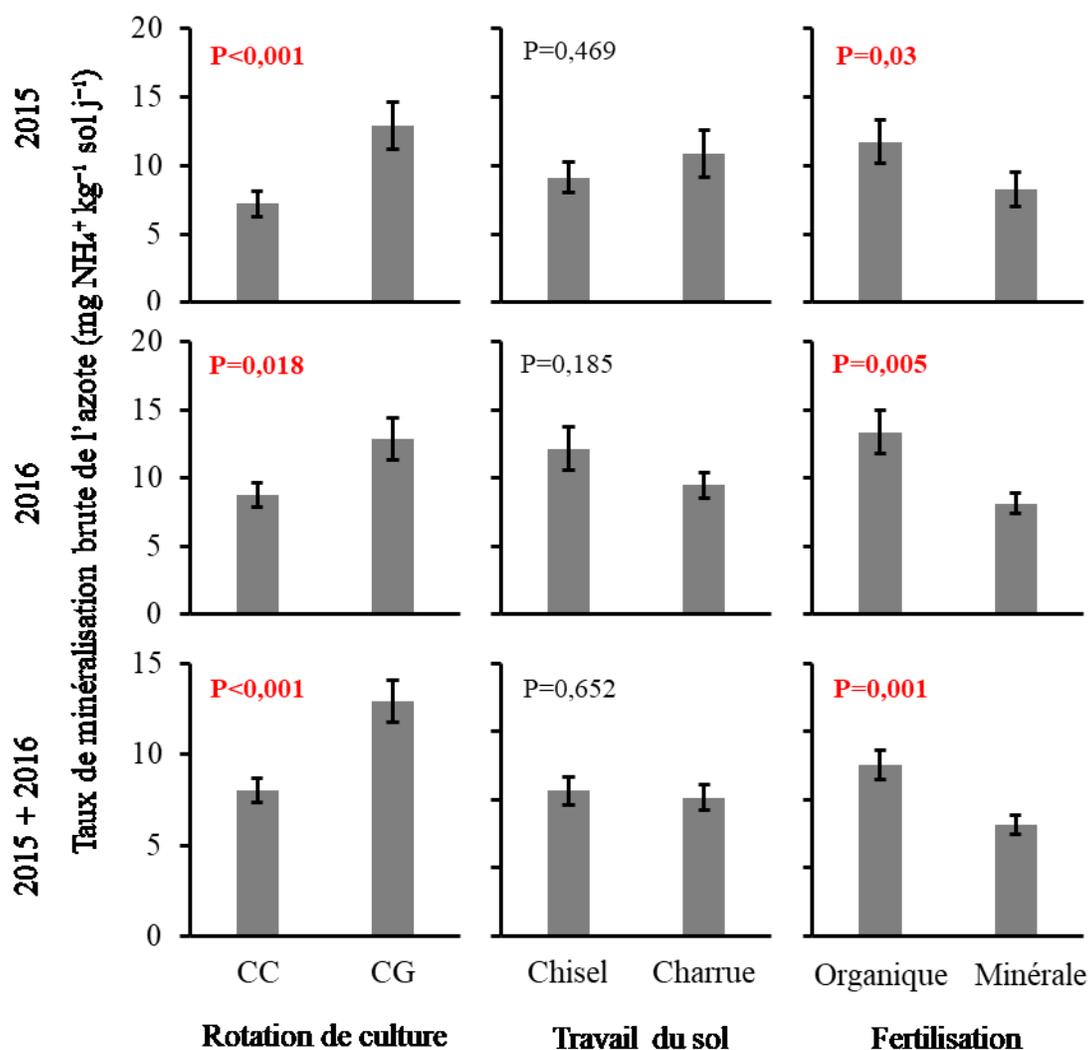


Figure 2. Taux de MBN ($\text{mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$) en fonction de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)], du travail du sol (chisel et charrue) et de la fertilisation (organique et minérale) pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016 combinées. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

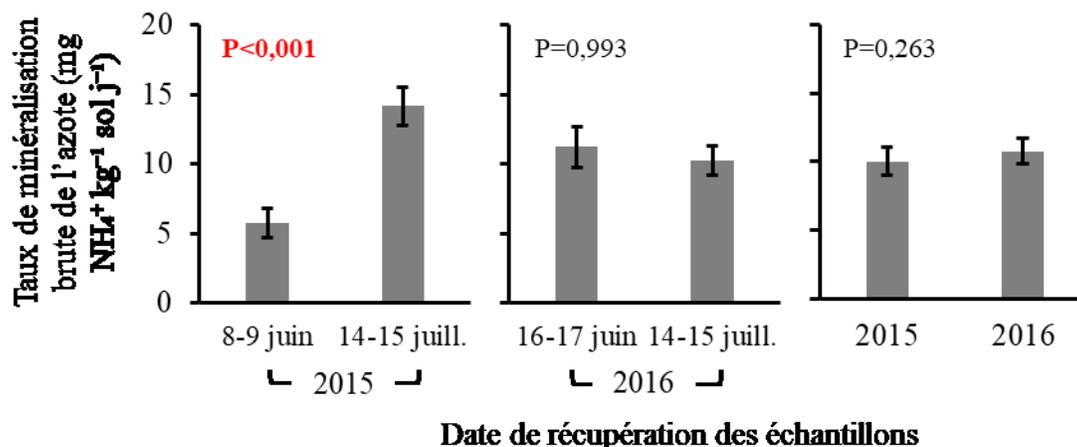


Figure 3. Taux de MBN (mg N-NH₄⁺ kg⁻¹ sol j⁻¹) en fonction de la date d'échantillonnages pour les mois de juin et de juillet de 2015 et 2016 ainsi que pour l'année 2015 et 2016 pris individuellement. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les dates de récupération à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

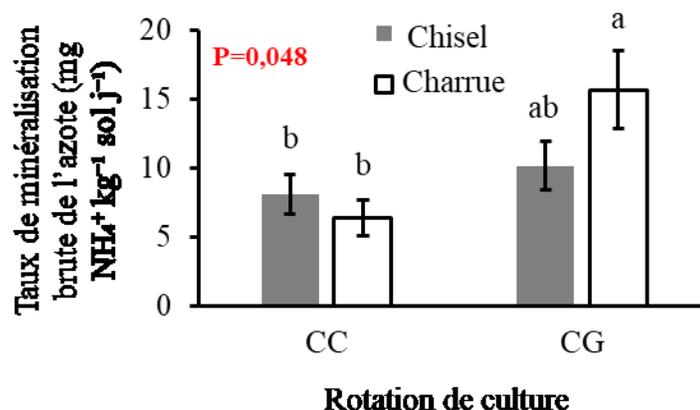


Figure 4. Taux de MBN (mg N-NH₄⁺ kg⁻¹ sol j⁻¹) en fonction de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)] et du travail du sol (chisel et charrue) pour l'année 2015. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

4.2 LA DÉCOMPOSITION DE LA LITIÈRE

4.2.1 PAILLE DÉCOMPOSÉE

En 2015, la proportion moyenne de paille décomposée a été significativement supérieure de 4 % lorsque la céréale était cultivée en rotation (CG) plutôt qu'en continu (CC) (figure 5). Pour l'année 2016 et les années combinées 2015 + 2016, la rotation des cultures n'a pas affecté significativement la proportion de paille décomposée (figure 5). Les travaux de sol n'ont pas présenté une proportion moyenne de paille décomposée significativement différente, et ce, pour toutes les années à l'étude (figure 6). En 2016, la fertilisation organique présente une proportion moyenne de paille décomposée significativement plus élevée de 2 % comparativement à la fertilisation minérale (figure 5). Toutefois, pour l'année 2015 et les années combinées 2015 + 2016, la proportion moyenne de paille décomposée n'était pas significativement différente entre les fertilisations (figure 5). Pour toutes les années à l'étude, la décomposition de la paille a significativement progressé au cours du temps écoulé depuis la date d'enfouissement des sachets (figure 6). Entre le 25 septembre 2015 et le 18 mai 2016, la proportion moyenne de paille décomposée est demeurée similaire (figure 6). La décomposition de la litière n'a donc pas eu lieu (non significatif) durant les périodes automnales et hivernales. En 2015, pour la cinquième date de récupération, la proportion moyenne de paille décomposée était significativement plus élevée de 11 % en CG plutôt qu'en CC (figure 7). Toujours en 2015, en fonction de la rotation de culture, la proportion moyenne de paille décomposée n'a pas été significativement affectée aux quatre premières dates de récupération des sachets (figure 7).

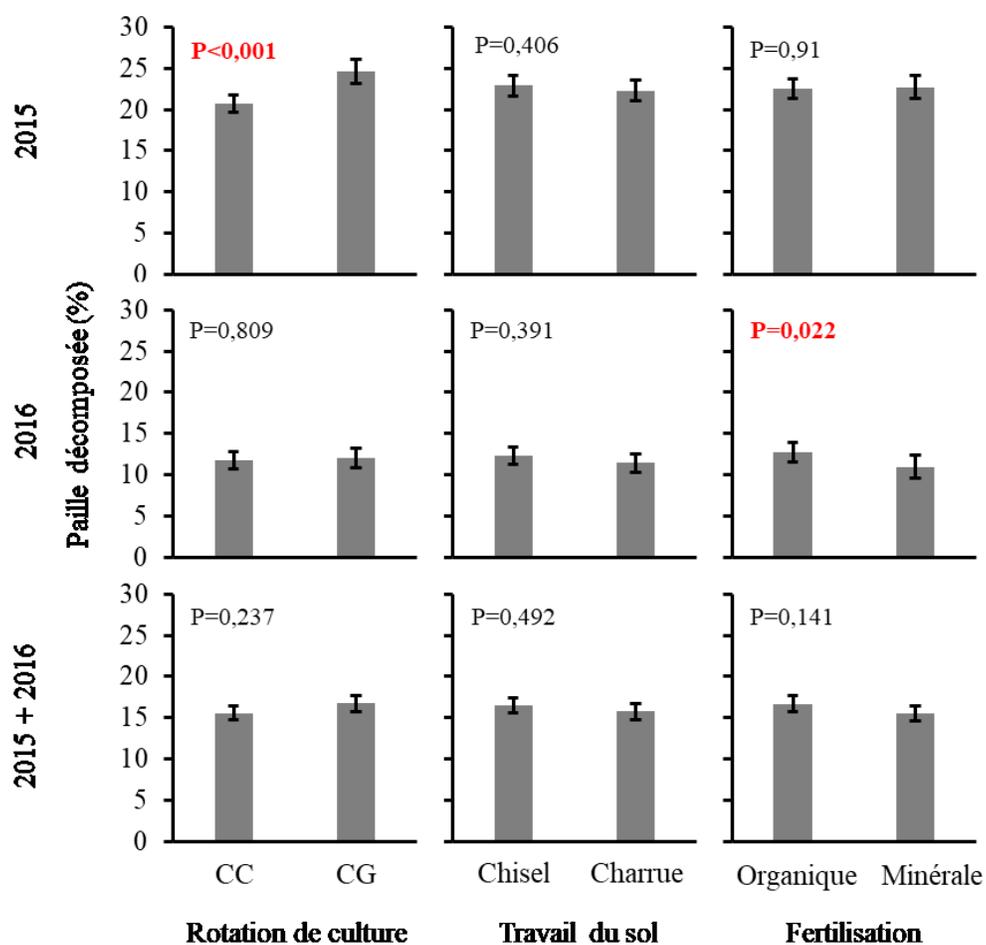


Figure 5. Paille décomposée (%) en fonction de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)], du travail du sol (chisel et charrue) et de la fertilisation (organique et minérale) pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

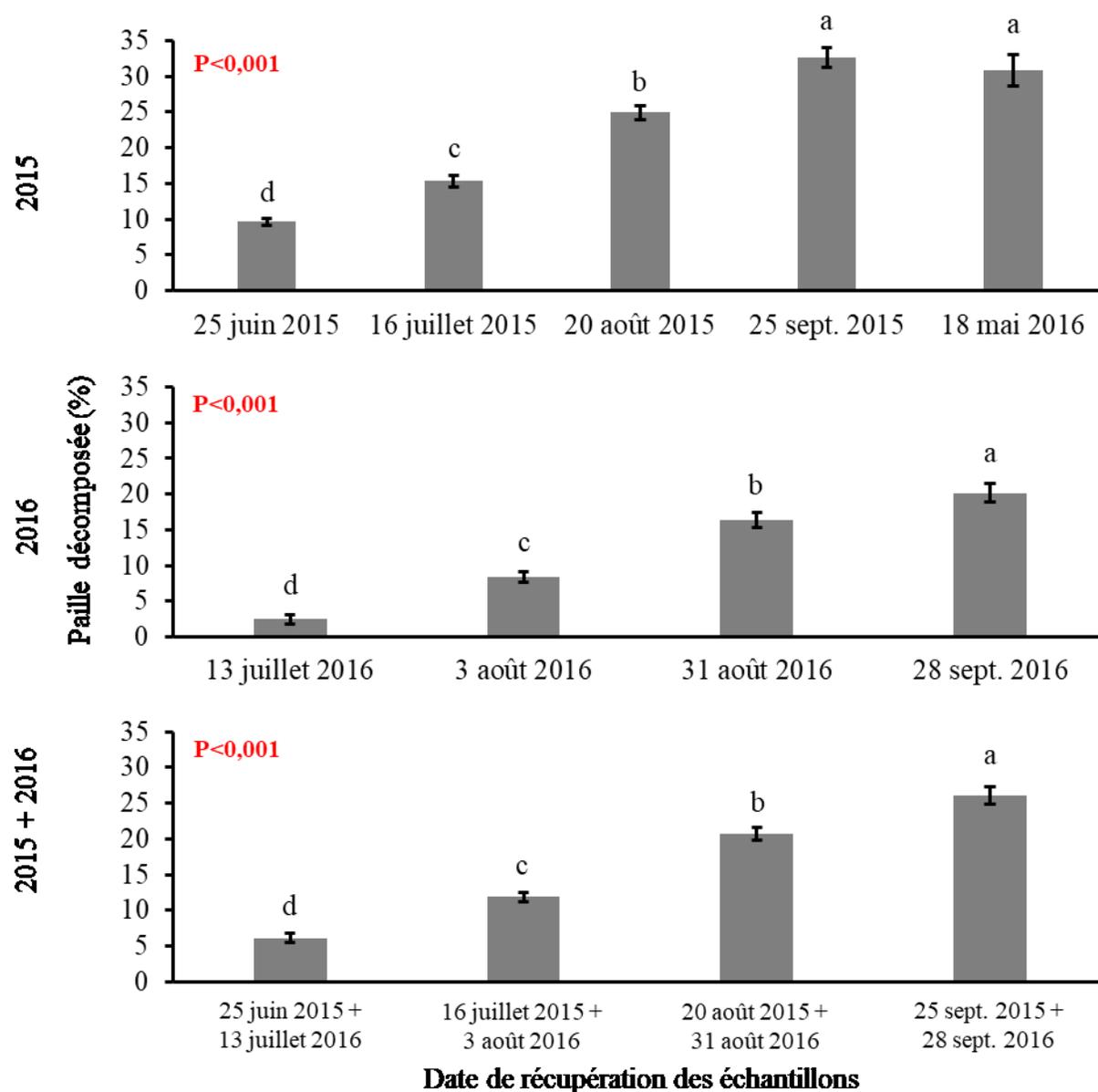


Figure 6. Paille décomposée (%) en fonction de la date de récupération des échantillons pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les dates à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

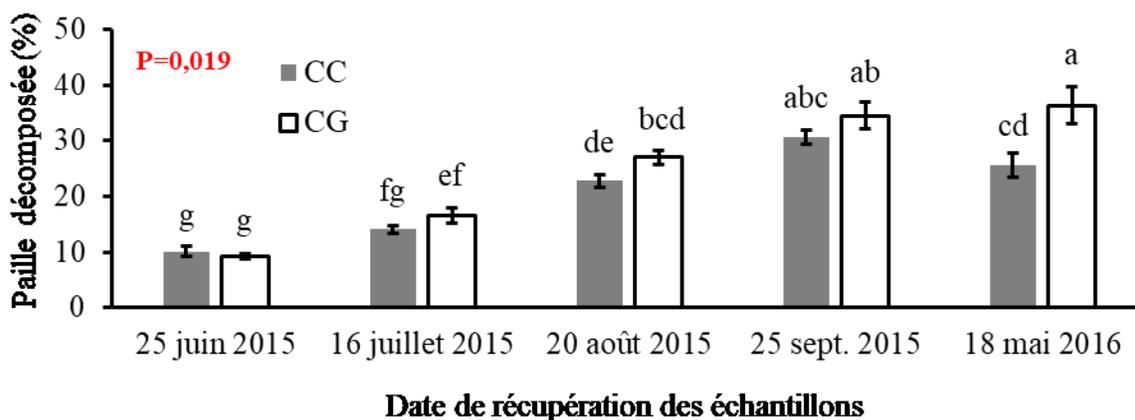


Figure 7. Paille décomposée (%) en fonction de la date de récupération des échantillons et de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)] pour l'année 2015. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements et les dates à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

4.2.2 CARBONE DÉCOMPOSÉ DE LA PAILLE

En 2015, la proportion moyenne de C décomposé de la paille a été significativement plus élevée de 3 % en CG plutôt qu'en CC (figure 8). En 2016 et pour les années combinées 2015 + 2016, le facteur rotation de cultures n'a pas affecté significativement la proportion moyenne de C décomposé de la paille (figure 8). Par ailleurs, la proportion moyenne de C décomposé de la paille n'était pas significativement affectée par les différents travaux de sol ou les différentes fertilisations, et ce, pour toutes les années de l'expérience (figure 8). La proportion moyenne de C décomposé de la paille a augmenté au cours du temps (figure 9). Toutefois, entre le 25 septembre 2015 et le 18 mai 2016, la proportion de C décomposé de la paille est demeurée similaire (figure 9). De même, en 2016, les deux premières dates de récupération n'avaient pas une proportion moyenne de C décomposé de la paille significativement différente entre elles (figure 9). De même, pour les années combinées 2015 + 2016, seules les deux premières dates de récupération ne présentaient pas une proportion moyenne de C décomposés de la paille significativement différente entre elles (figure 9). Pour 2015, à la cinquième date de récupération des échantillons, la proportion moyenne de C décomposée de la paille était significativement supérieure de 11 % pour le traitement CG plutôt que le traitement CC (figure 10).

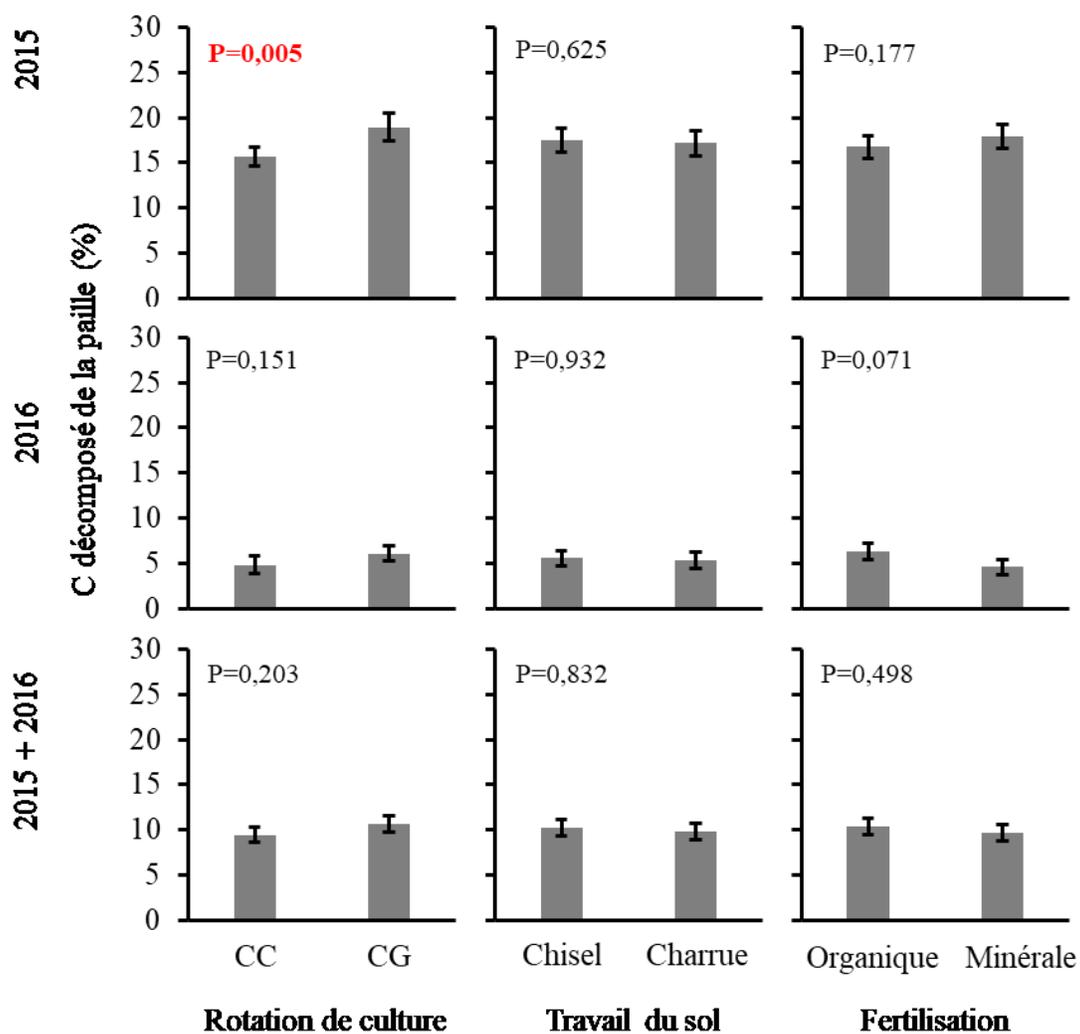


Figure 8. C décomposé de la paille (%) en fonction de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)], du travail du sol (chisel et charrue) et de la fertilisation (organique et minérale) pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

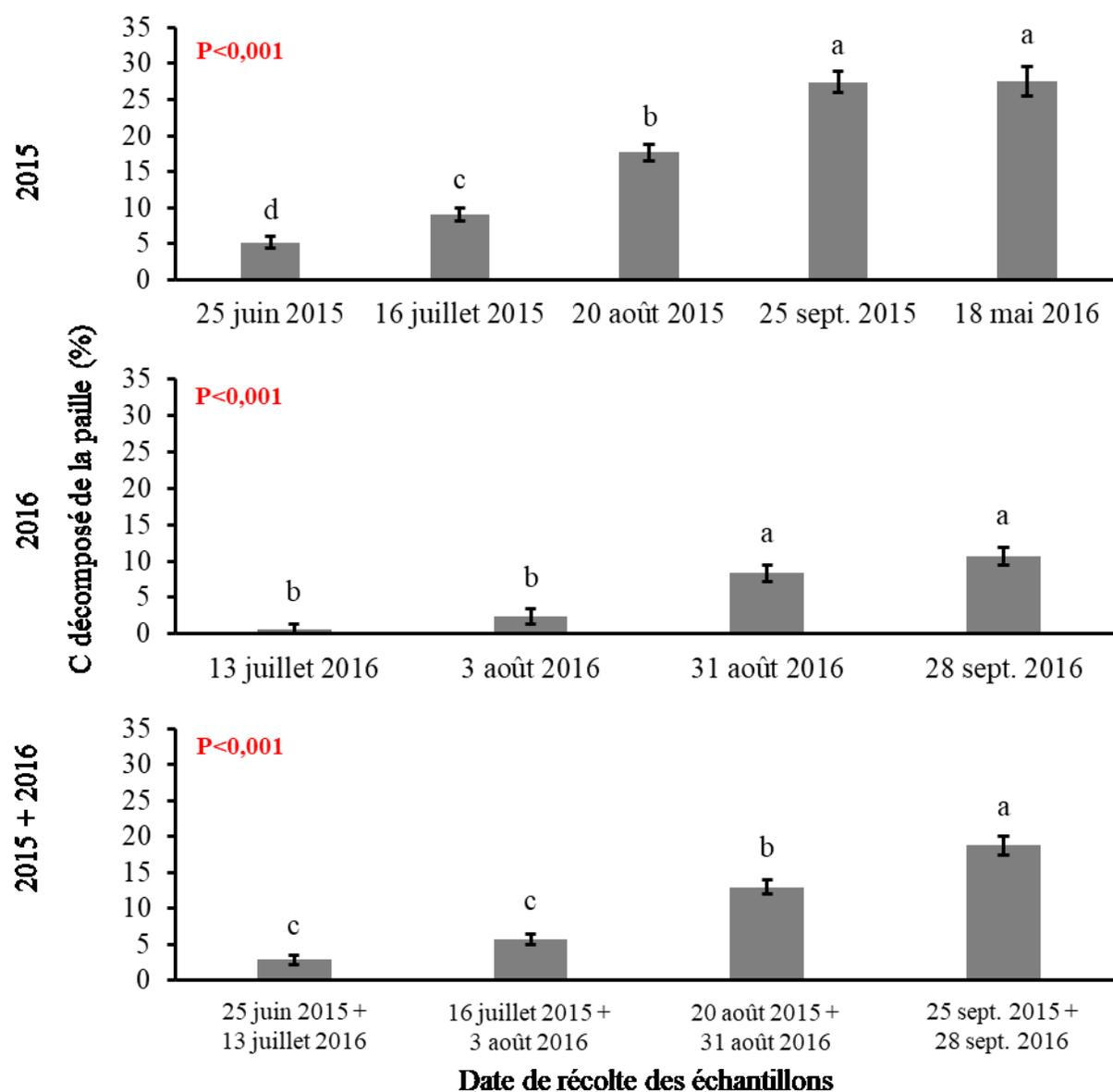


Figure 9. C décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les dates de récupération à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

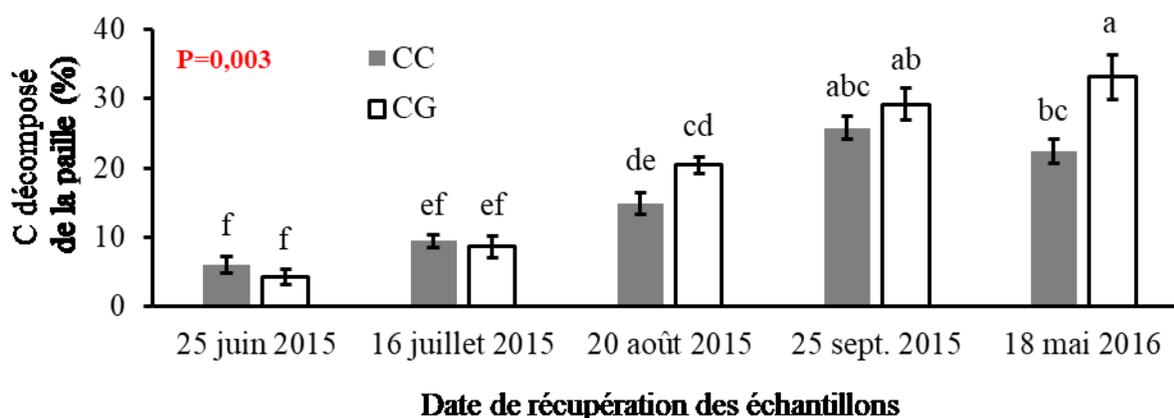


Figure 10. C décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons et de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)] pour l'année 2015. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements et les dates à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

4.2.3 AZOTE DÉCOMPOSÉ DE LA PAILLE

La proportion moyenne d'N décomposé de la paille a été significativement supérieure lorsque la céréale était cultivée en rotation (CG) par rapport à la céréale cultivée en continu (CC) soit de 3 % pour l'année 2015 et 2016. Les traitements de rotation ne présentaient toutefois pas de différences significatives pour les années combinées 2015 + 2016 (figure 11). Dans le cas des années combinées 2015 + 2016, seul les quatre premières dates de chaque année sont prises en compte. Cela exclut la cinquième date de 2015 et explique ainsi l'absence de différences significatives pour les années combinées. Le traitement charrue présente une proportion moyenne d'N décomposé supérieure de 3 % pour l'année 2016 et de 4 % pour les années combinées 2015 + 2016 par rapport au traitement chisel, mais est similaire en 2015 (figure 11). La proportion moyenne d'N décomposé de la paille n'était pas affectée par le type de fertilisation, et ce, pour toutes les années de cette étude (figure 11). En 2015, la proportion moyenne d'N décomposé a augmenté avec le temps, bien que la première et la cinquième date ne soient pas significativement différentes (figure 12). En 2016, la proportion moyenne d'N décomposé a été comparable pour toutes les dates de récupération à l'exception de la dernière où la valeur était significativement plus faible que les autres dates (figure 12). Les dates de récupération pour les années combinées 2015

+ 2016 présentait peu de différence de proportion moyenne d’N décomposé de la paille, avec seulement la troisième date qui est significativement supérieure de 4 % par rapport à la première date (figure 12). En 2015, la proportion moyenne d’N décomposé de la paille était significativement supérieure de 8 % pour la combinaison de traitement charrue-minéral par rapport à la combinaison chisel-minéral (figure 13). Ces mêmes combinaisons de traitements (charrue-minéral et chisel-minéral) n’étaient pas significativement différentes par rapport aux combinaisons chisel-organique et charrue-organique (figure 13). Pour l’année 2015, la proportion moyenne d’N décomposé de la paille était similaire au sein de chacune des dates de récupération à l’exception de la cinquième date où le traitement CG a été significativement supérieur de 11 % au traitement CC (figure 14). Lors de l’année 2016, la proportion moyenne d’N décomposé de la paille a été significativement supérieure de 10 % pour le traitement CG par rapport à CC seulement à la deuxième date de récupération des échantillons (figure 15). Pour les années combinées 2015 + 2016, la proportion moyenne d’N décomposé de la paille supérieure de 8 % pour le traitement CG par rapport à CC seulement à la deuxième date de récolte combinée des échantillons (figure 16). En 2015, même si le test d’ANOVA a présenté une différence, le test *a posteriori* de Tukey n’a pas détecté de différence significative d’N décomposé de la paille entre le chisel et la charrue, et ce, pour chacune des dates de récupération (Figure 17).

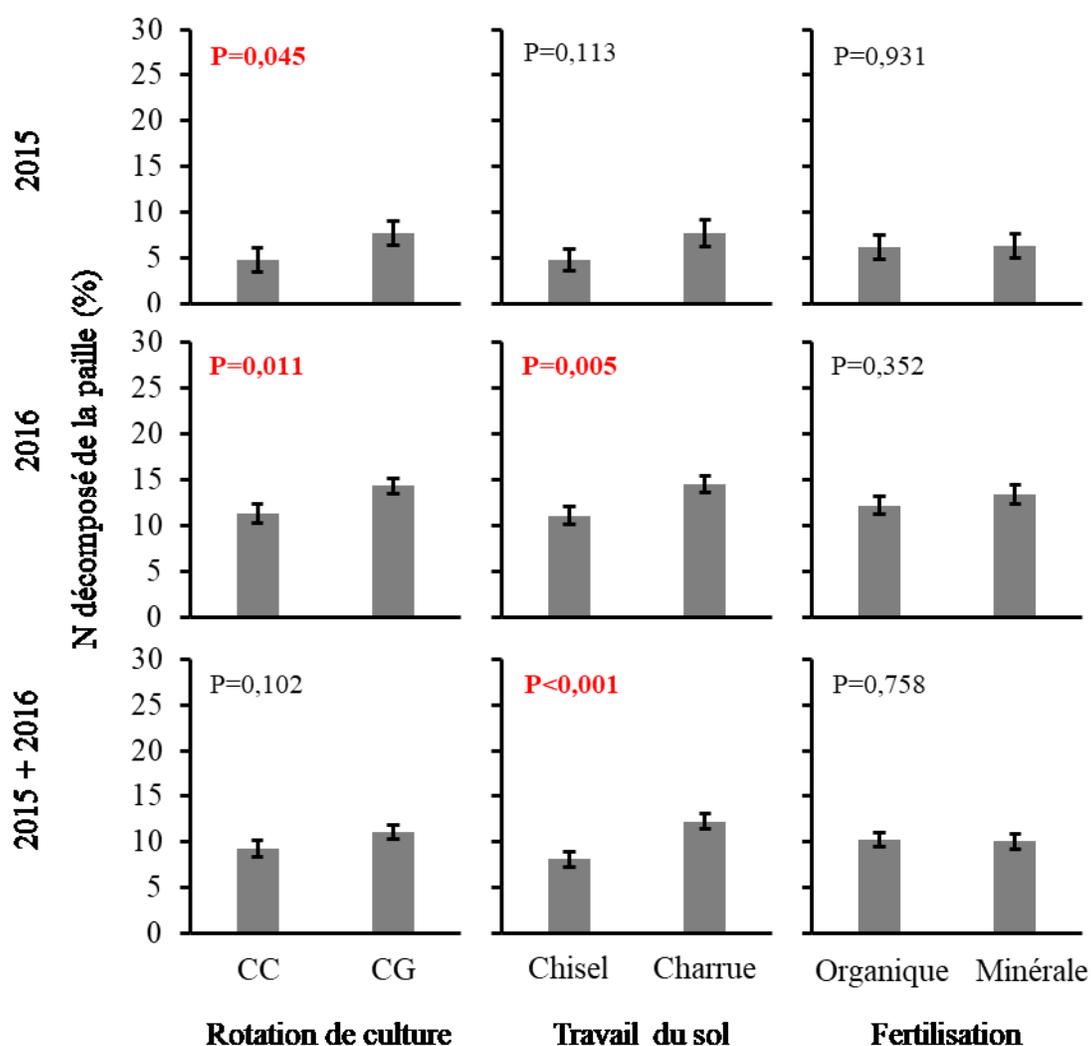


Figure 11. N décomposé de la paille (%) en fonction de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)], du travail du sol (chisel et charrue) et de la fertilisation (organique et minérale) pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

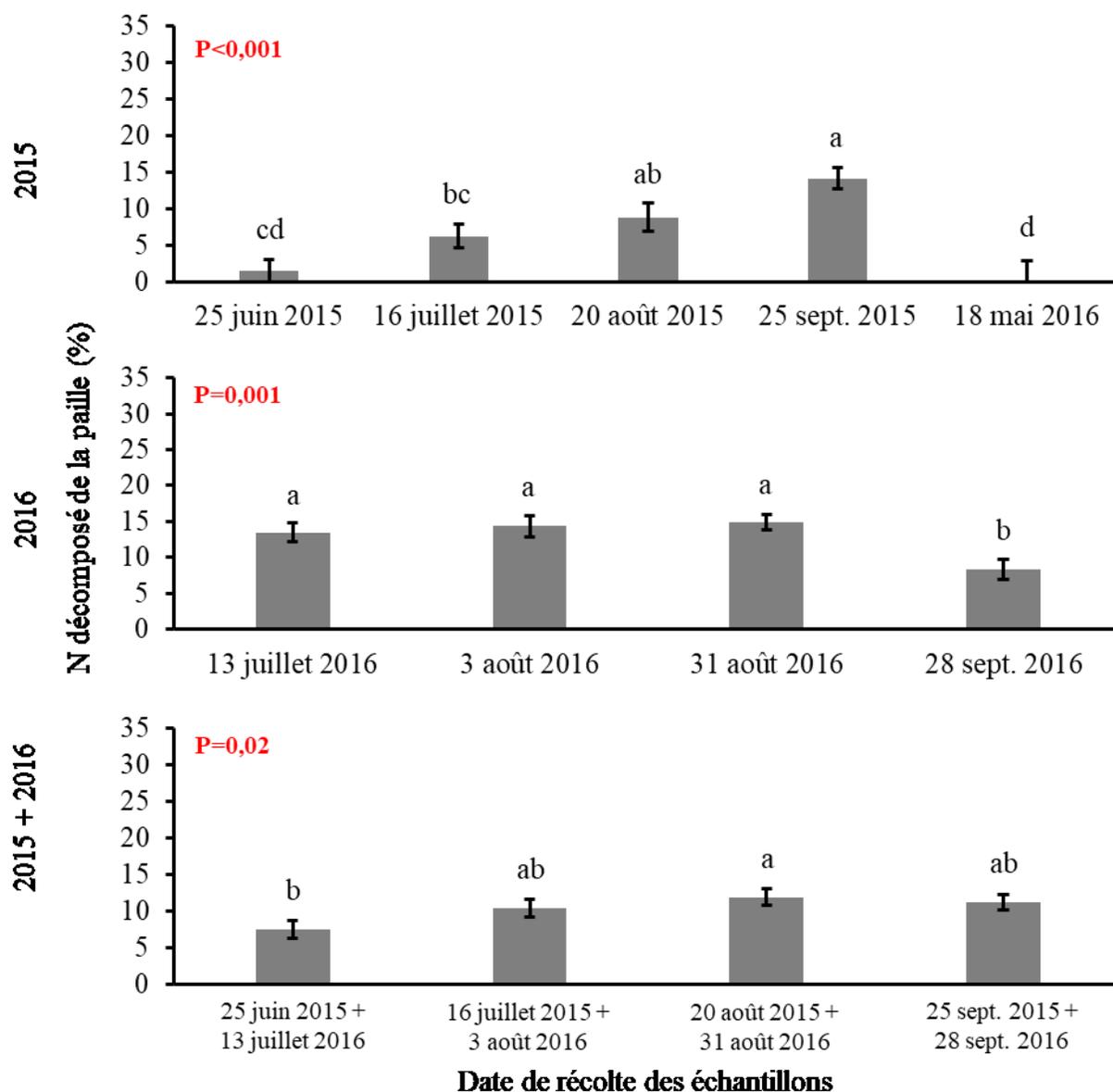


Figure 12. N décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons pour les années 2015, 2016 et 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les dates lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

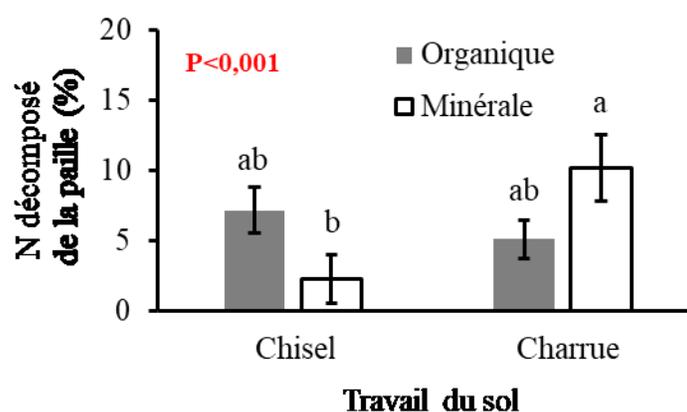


Figure 13. N décomposé de la paille (%) en fonction du travail du sol (chisel et charrue) et de la fertilisation (organique et minérale) pour l'année 2015. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

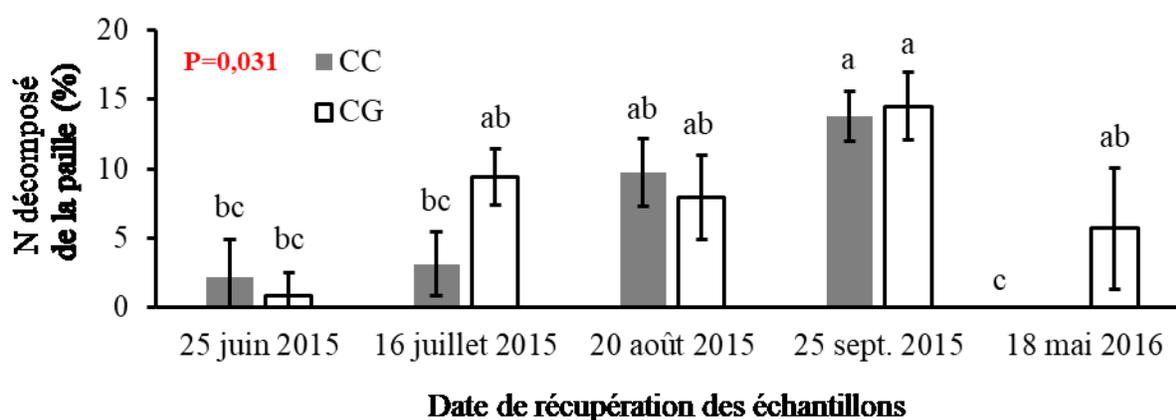


Figure 14. N décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons et de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)] pour l'année 2015. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements et les dates lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

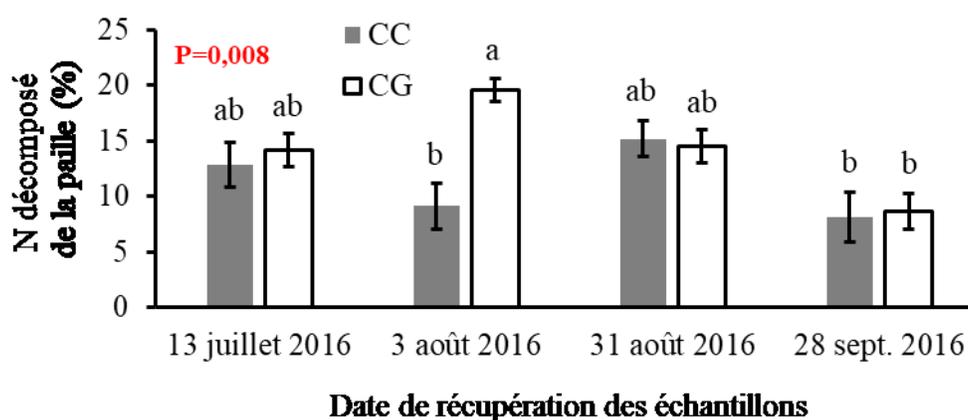


Figure 15. N décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons et de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)] pour l'année 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements et les dates lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

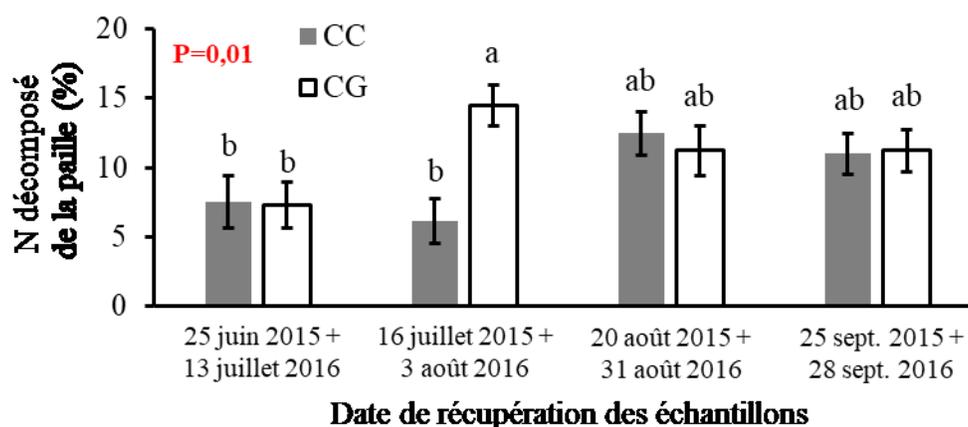


Figure 16. N décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons et de la rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)] pour l'année 2015 + 2016. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements et les dates lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

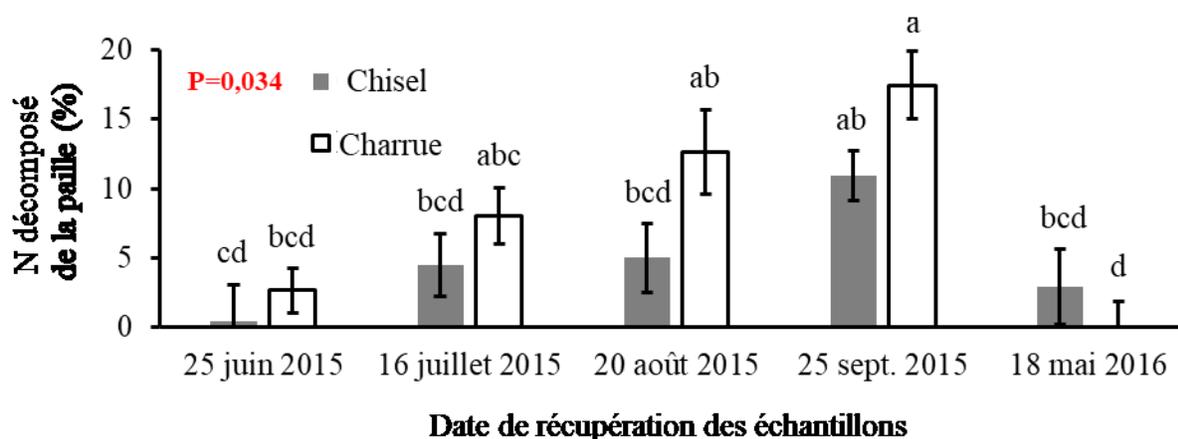


Figure 17. N décomposé de la paille (%) en fonction de la date de récupération des échantillons et du travail du sol (chisel et charrue) pour l'année 2015. Les valeurs de P sont issues de l'annexe A et indiquent la probabilité d'une différence significative entre les traitements et les dates lorsque celle-ci est à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les moyennes qui ne partagent pas les mêmes lettres sont significativement différentes selon un test de Tukey à un niveau de confiance $\alpha = 0,05$.

5. DISCUSSION

5.1 FACTEUR ROTATION DE CULTURE

La présente étude a démontré que la MBN et la DL, deux processus représentant l'activité des organismes du sol, ont été significativement supérieurs lorsque la céréale était cultivée en rotation avec une prairie (CG) plutôt qu'une céréale cultivée en continu (CC) (figures 2, 5, 8 et 11). La présence prolongée de plantes fourragères pérennes (mélange de dactyle et trèfle rouge) dans un système de rotation avec une céréale serait à l'origine de l'activité biologique supérieure dans le sol (Fageria 2012). Nos résultats sont en accord avec ceux de l'étude d'Attard *et al.* (2016) où une prairie établie depuis huit ans a présenté une MBN équivalente au double de celle mesurée avec des plantes annuelles cultivées en continu. Les bénéfices de la rotation avec une prairie apparaissent trois ans suivant l'implantation, suggérant une communauté microbienne plus active lorsque le système racinaire s'est développé pleinement en profondeur (Attard *et al.* 2016). Les apports en MO labiles issus de la décomposition de la prairie peuvent également expliquer les hauts taux de MBN observés dans la rotation CG. C'est ce que démontre une étude menée en France dans un loam limoneux où le sol avait un taux de MBN supérieur lorsque de la paille fraîche était incorporée au sol stimulant ainsi l'activité des microorganismes (Recous *et al.* 1998). Il a d'ailleurs été mesuré

(sur le dispositif expérimental de la présente étude) que la proportion de C organique augmentait de 19 % dans les 50 premiers cm du sol cultivé en CG par rapport à la CC (Maillard *et al.* 2016). Par conséquent, nos résultats (combinés avec la précédente étude) suggèrent l'adaptation de la communauté microbiologique du sol à accélérer les processus de DMO pour compenser l'accumulation de résidus dans le sol. Nos résultats supportent également l'idée que les augmentations de rendements observées par Lafond *et al.* (2017) ont été occasionnés, en grande partie, par une capacité plus grande des sols sous CG à minéraliser de l'N organique en N minéral due à des réserves d'N organique conséquentes avec la rotation CG.

La rotation en CG avec l'emploi d'une charrue a présenté une MBN significativement supérieure à la majorité des autres combinaisons de traitement (figure 4). La faible fréquence des travaux de sol (une année sur trois en CG) et l'importante remise en circulation des nutriments (avec la charrue) a pu causer cette hausse spécifique d'activité microbiologique du sol (Recous *et al.* 1998; Balesdent *et al.* 2000). Par conséquent, nos résultats sont en accord avec ceux présentés par Lafond *et al.* (2017) où la combinaison CG-charrue a permis l'atteinte de plus grands rendements en grain.

5.2 FACTEUR TRAVAIL DU SOL

Les traitements chisel et charrue à versoir n'ont pas présenté de différences significatives pour le taux de MBN, la DL et la proportion de C décomposé de la paille (figures 2, 5 et 8). Ces résultats sont en accord avec une étude menée avec plusieurs sols de l'Est du Canada où le chisel et la charrue à versoir n'ont pas influencé significativement l'accumulation de MO (et donc possiblement la DMO) dans les sols (Angers *et al.* 1997). Dans un même ordre d'idée, l'étude de Valboa *et al.* (2015) menée en Italie sur un loam a démontré que la proportion de C organique a été similaire dans les 40 premiers cm du sol subissant autant l'action d'une charrue que d'une herse à disques. Ces tendances peuvent s'expliquer par l'importante similitude entre les différents travaux de sol. S'il est connu que le chisel et la charrue redistribuent tous deux les résidus dans le profil de sol (avec toutefois des intensités différentes, où charrue > chisel), pour sa part l'absence de travail du sol (ex. : semis direct) ne cause pas de redistribution spatiale des nutriments et engendre souvent des taux plus bas de MBN (Morris *et al.* 2010) et de DL (Angers *et al.* 1997). De

plus, en l'absence d'un travail du sol (ex. : semis direct), la MBN s'opère de façon relativement constante dans le temps, à la différence d'un travail du sol conventionnel où les processus de MBN s'accroissent directement après le labour qui favorise un meilleur contact entre la MO fraîche et les microorganismes qui procèdent à sa minéralisation (Francis *et al.* 1992; Six *et al.* 2004). De la même manière, la DL est souvent stimulée à la suite de la réalisation des travaux de sol (Beyaert et Voroney 2011; Van Eerd *et al.* 2014). Si les mesures avaient été prises peu de temps après l'application des travaux de sol, des différences auraient pu être décelées.

La présente étude porte sur les premiers 15 cm du sol et, de ce fait, n'évalue pas les processus biogéochimiques qui s'opèrent plus en profondeur. Par exemple, Angers *et al.* (1997) ont déjà démontré que l'utilisation de la charrue peut s'accompagner de concentrations en C et en N supérieures dans les couches sous-jacentes (>20 cm) du sol. En somme, puisque la présente étude n'évalue pas l'absence de travaux de sol (ex. : semis direct) et que le chisel et la charrue sont similaires quant à la profondeur du travail du sol (15 cm versus 20 cm), cela peut expliquer pourquoi il n'a pas été possible d'observer de différences significatives au niveau des travaux de sols pour la MBN mesurée en surface (5-15 cm). Toutefois, nos résultats indiquent que l'N de la paille s'est plus décomposée avec le traitement charrue plutôt qu'avec le chisel (figure 11). Plusieurs études soulignent que l'utilisation de travaux de sol agressifs réduit l'accumulation d'N organique dans le sol sur le long terme (Cambardella et Elliott 1993; Nyborg *et al.* 1995; Balesdent *et al.* 2000) puisque la MO dans la couche affectée par les travaux de sol est physiquement plus exposée à l'activité des microorganismes du sol par le fractionnement des agrégats (Balesdent *et al.* 2000; Beyaert et Voroney 2011; Van Eerd *et al.* 2014). En effet, un sol à texture argileuse et un climat froid et humide peuvent ralentir considérablement la MBN et donc, permettre l'accumulation d'N organiques dans le sol (Paré *et al.* 2015). Par exemple, une étude menée sur 34 sites en prairie dans l'est du Québec a démontré que les sols riches en argile et en limon emmagasinaient beaucoup plus d'N et de C organiques (N et C potentiellement minéralisables) comparativement aux sols riches en sable (Sbih *et al.* 2003). De plus, nos résultats indiquent que la combinaison charrue avec une fertilisation minérale a présenté une proportion d'N décomposée de la paille significativement supérieure en comparaison à la combinaison chisel avec fertilisation minérale (figure 13). Il est maintenant connu (résultats issus du même dispositif) que le sol travaillé

par la charrue et amendé par l'engrais minéral peut présenter de plus faibles réserves en N organique (Maillard *et al.* 2016). Par conséquent, il est possible que les microorganismes compétitionnent davantage pour l'N organique du sol lorsque des combinaisons de traitements ne favorisent pas son accumulation dans le sol, d'où la décomposition consécutive de l'N issu de la paille dans les parcelles labourées et sous fertilisation minérale (figures 11 et 13). Par ailleurs, l'étude de Maillard *et al.* (2016) souligne que les travaux de sol n'ont pas influencé le C organique du sol, mais que la fréquence des travaux, en fonction du système de rotation des cultures, influence davantage la décomposition. L'interaction de ces deux facteurs peut donc expliquer en grande partie la dynamique des réserves en nutriments du sol.

5.3 FACTEUR FERTILISATION

De manière générale, l'application d'un engrais organique (comparativement à l'engrais minéral) a augmenté la MBN et a eu un effet légèrement positif sur la DL (figures 2 et 5). Ces résultats sont en accord avec plusieurs études portant sur la MBN (N'Dayegamiye *et al.* 1997; Habteselassie *et al.* 2006; Odlare *et al.* 2014) et la DL (N'Dayegamiye 2009; Angers *et al.* 2010). Une étude menée en Suède sur un sol argileux Eutric Cambisol (classification de la FAO), dont la concentration en MO était généralement faible, a démontré que l'application d'engrais organiques augmente significativement la minéralisation de l'N (Odlare *et al.* 2014). Une seconde étude, celle-ci menée en Utah aux États-Unis, a apporté des conclusions similaires où le lisier de bovin a constitué une source constante d'N minéralisable, et ce, sur le long terme (Habteselassie *et al.* 2006). En effet, les apports en composés organiques (à la différence de l'engrais minéral) augmentent la proportion d'N organique labile dans le sol et stimulent les processus de décomposition s'y rattachant (Habteselassie *et al.* 2006). Une autre étude, celle-ci menée au Québec dans un loam limoneux, a démontré que l'apport d'engrais organiques plutôt que minéraux augmente plusieurs propriétés biologiques du sol telles que la minéralisation de l'N [ici évaluée indirectement par une mesure du nitrate (NO_3^-)], la respiration microbienne ainsi que la biomasse microbienne (N'Dayegamiye *et al.* 1997). Par ailleurs, les apports en engrais organiques augmentent significativement les teneurs en C et en N du sol sur le long terme, en comparaison à l'apport d'engrais minéraux (N'Dayegamiye *et al.* 1997; Maillard *et al.* 2016). Les hauts taux de

MBN mesurés par la présente étude ont donc été causés, en partie, par l'application de lisier de bovin dont les effets sont connus pour stimuler l'activité microbologique du sol, surtout dans le cas où les réserves en N sont importantes comme avec l'application de lisier de bovin (Maillard *et al.* 2016).

Pour ce qui est de la DL, certains résultats issus de la littérature se dirigent dans le même sens que nos travaux. En effet, une étude menée au Québec sur un loam argileux de série Ste-Rosalie et sur un loam sableux de série St-Jude a démontré que l'application d'engrais organiques a pour effet de stimuler la DL puisqu'en plus d'un apport de MO facilement minéralisable, améliore la structure, l'aération et la capacité de rétention en eau du sol (N'Dayegamiye 2009). Dans une autre étude menée au Québec sur un loam limono-argileux, l'utilisation d'un fertilisant organique (lisier de porc) a stimulé la DL et la décomposition de la MO déjà présente dans le sol avant les applications (Angers *et al.* 2010), suggérant ainsi un effet catalyseur (« *Priming Effect* ») des engrais organiques sur la vieille MO (ou plus passive) du sol. Toutefois, nos résultats montrent que, comparativement à la rotation des cultures, le type de fertilisant utilisé a eu peu d'impact sur les variables relatives à la DL (figures 5, 8 et 11), corroborant ainsi, une fois de plus, les résultats issus du même dispositif montrant des effets relativement négligeables du type de fertilisation (versus la rotation) sur les rendements en grains de la culture annuelle (Lafond *et al.* 2017).

5.4 FACTEUR TEMPS

En 2015, la MBN a été supérieure en juillet plutôt qu'en juin, alors qu'en 2016, aucune différence n'a été observée entre les deux périodes d'échantillonnages (figure 3). Par ailleurs, les années 2015 et 2016 ont présenté une MBN généralement similaire (figure 3). Pour mieux comprendre ces tendances saisonnières, la précipitation totale et la température moyenne de la Ferme de recherche de Normandin ont été analysées pour ces périodes (figures 18 et 19 en annexe B). Les données climatiques soulignent qu'en 2015 les précipitations, tout comme la MBN, ont été supérieures durant le mois de juillet comparativement à celles de juin (figure 18 en annexe B), alors qu'en 2016, la MBN, les précipitations et la température moyenne sont relativement semblables entre juin et juillet (figures 18 et 19 en annexe B). À l'inverse des taux de MBN différent pour juin et juillet 2015, la température moyenne pour ces mois est similaire (figure 19 en annexe B). Cela

suggère que les processus de MBN auraient été plus affectés par les précipitations que par la température moyenne en cette période de l'année.

Chose peu surprenante, la DL a augmenté avec la durée d'incubation (figures 6 et 9). Une étude menée sur un loam limoneux-argileux au Texas a démontré qu'une plus grande quantité de C du sol est minéralisée durant la période de floraison et de récolte à l'inverse de la période de plantation (Franzluebbbers *et al.* 1994). Il s'agit là d'une tendance similaire à la présente étude où la DL est plus importante en période estivale (versus les périodes printanières, automnales et hivernales). Pour sa part, la proportion d'N décomposé de la paille n'a pas été constante lors de toutes les années de l'étude (figure 13). Ce résultat fut également démontré dans l'étude de Franzluebbbers *et al.* (1994) où la minéralisation de l'N dans le sol n'a pas fluctué en fonction des conditions climatiques de la saison de croissance. Il se peut alors qu'il y ait eu une immobilisation de l'N dans le sol tout au long de la saison de culture. De manière générale, la seconde date de récupération a présenté une plus grande décomposition de l'N de la paille en CG plutôt qu'en CC (figure 15 et 16). Ces observations sont elles aussi en accord avec l'étude de Franzluebbbers *et al.* (1994) qui souligne qu'une forte DL a lieu durant la période de floraison de la céréale.

Aucune différence significative n'a été mesurée pour la DL durant la période hivernale, soit la période entre le 25 septembre 2015 et le 18 mai 2016 (figure 6). Dans une revue de littérature rédigée par Brooks *et al.* (2011), il a été mentionné qu'un couvert de neige permet une activité microbiologique dans le sol. Toutefois, pour disposer d'un couvert de neige adéquat, la végétation en place et/ou un brise-vent doit permettre un ralentissement du vent (Brooks *et al.* 2011). Ce n'est pas le cas dans la présente étude où aucune structure n'a permis de ralentir le vent et ainsi de favoriser une accumulation de neige. Par ailleurs, à partir de la dernière date de récolte, soit le 18 mai 2016, la DL est supérieure avec le traitement CG plutôt qu'avec CC (figures 7, 10 et 14). La présence de plantes fourragères au mois de mai avec le traitement CG peut expliquer cette tendance. En effet, les sols possédant un couvert végétal vivant et un système racinaire bien implanté permettent une décomposition plus rapide de la MO tôt au printemps (Angers et Caron 1998; Brooks *et al.* 2011). Toutefois, il demeure également possible que cette différence soit simplement causée par le retrait temporaire (entre le 25 septembre et le 15 octobre) des sachets implantés dans certaines parcelles avec travail du sol (nécessaire pour permettre la réalisation des travaux de sol).

En effet, le retrait temporaire des sachets de paille a sans doute causé le bris des hyphes fongiques (Wessen et Berg 1986), ce qui peut expliquer en partie (seulement les parcelles avec travail du sol) les faibles taux de DL durant la période hivernale.

5.5 LES BÉNÉFICES DE LA DMO

La présente étude a permis d'acquérir de meilleures connaissances relatives à l'évaluation des processus biologiques *in-situ* de minéralisation de l'azote du sol et de la décomposition de la litière, et ce, durant presque deux années complètes dans la région Nord du Lac-Saint-Jean. Les producteurs peuvent s'attendre à ce que leurs sols fournissent près de $10,8 \text{ mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$ via le processus de MBN entre les stades tallage (Z15) et élongation de la tige (Z40) (figure 3). Cette valeur moyenne est dans les standards pour un sol agricole (Booth *et al.* 2005). Il s'agit là d'un moment important pour l'assimilation d'N par les plants d'orge (Diacono et Montemurro 2010; Fageria 2012). De plus, les producteurs devraient observer des pertes (ou décomposition) de près de 27 % annuellement en litière (figure 6). Mais plus important encore, les résultats de ce projet permettent de cibler des combinaisons de pratiques agricoles contrastantes en termes de DMO. En effet, dans le cas où la disponibilité des nutriments et le besoin de la culture concordent, la capacité du sol à fournir les éléments nutritifs (c.-à-d. la DMO) est inversement proportionnelle aux besoins en engrais des cultures. Ainsi, maintenant que ces pratiques sont ciblées (résultats de ce mémoire), une étude subséquente avec différents taux d'application en engrais devrait être mise en œuvre pour déterminer les optimums en fertilisation.

6. CONCLUSION

Dans la région du SLSJ, la montée en popularité des cultures céréalières au détriment des cultures pérennes engendre des défis relatifs à la qualité du sol et à la productivité des cultures. Par ailleurs, le climat froid et humide de la région constitue un autre défi important quant aux choix des meilleures pratiques à adopter relativement à la rotation, au travail du sol et à la fertilisation. Ainsi, les meilleures pratiques à adopter devraient être celles favorisant notamment le recyclage des nutriments du sol via une augmentation de la DMO.

Les résultats issus de ce projet de maîtrise ont permis de documenter, pour la première fois au Lac-Saint-Jean, les effets de la rotation des cultures, le travail du sol et de la fertilisation sur la MBN et la DL, deux processus biologiques jouant des rôles clés dans la DMO et le recyclage des nutriments du sol. En effet, les résultats de cette étude montrent clairement qu'il est préférable d'utiliser une céréale cultivée en rotation avec une prairie (CG) plutôt qu'en continu (CC) afin de favoriser la capacité du sol à minéraliser l'N organique en N minéral (MBN) et à décomposer les résidus de cultures (DL). Pour ce qui est du travail du sol, l'absence de différences significatives entre la charrue à versoir (profondeur de 20 cm) et le chisel (profondeur de 15 cm) s'explique par le travail similaire qu'on ces pratiques sur la couche de sol en surface. Des différences auraient pu être décelées avec une absence de travail du sol ou avec des mesures effectuées peu de temps après le passage des instruments aratoires. Toutefois, malgré cette similarité, l'utilisation du chisel est recommandée en raison des gains importants en temps (plus grandes vitesses de passage) et en argent (besoins en diesel diminués) que cet instrument permet de réaliser. Finalement, cette étude a permis de démontrer la pertinence de privilégier l'utilisation des engrais organiques avant les engrais minéraux afin de favoriser la MBN et la DL dans le sol.

Ces résultats de recherche issus du dispositif d'AAC à Normandin me permettent de tirer des conclusions relativement robustes quant au choix des pratiques culturales à recommander sur le territoire du Lac-Saint-Jean. Toutefois, le choix final de ces pratiques ne devrait pas être uniquement basé sur la MBN et la DL, mais également sur d'autres propriétés biologiques, chimiques et physiques du sol, en plus des rendements agronomiques des cultures ainsi que leurs prélèvements en éléments nutritifs (Lafond *et al.* 2017). C'est seulement en tenant compte de toutes ces variables qu'une recommandation claire et précise pourra être énoncée.

RÉFÉRENCES

- Angers DA et Caron J. 1998. Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 42 : 55-72.
- Angers DA, Chantigny MH, MacDonald JD, Rochette P et Cote D. 2010. Differential retention of carbon, nitrogen and phosphorus in grassland soil profiles with long-term manure application. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 86 : 225-229.
- Angers DA, Bolinder MA, Carter MR, Gregorich EG, Drury CF, Liang BC, Voroney RP, Simard RR, Donald RG, Beyaert RP et Martel J. 1997. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. *Soil & Tillage Research*, 41 : 191-201.
- Attard E, Le Roux X, Charrier X, Delfosse O, Guillaumaud N, Lemaire G et Recous S. 2016. Delayed and asymmetric responses of soil C pools and N fluxes to grassland/cropland conversions. *Soil Biology and Biochemistry*, 97 : 31-39.
- Balesdent J, Chenu C et Balabane M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53 : 215-230.
- Beyaert RP et Fox CA. 2008. Assessment of soil biological activity. Dans : *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC Press, Boca Raton, p. 527-545.
- Beyaert RP et Voroney RP. 2011. Estimation of decay constants for crop residues measured over 15 years in conventional and reduced tillage systems in a coarse-textured soil in southern Ontario. *Canadian Journal of Soil Science*, 91 : 985-995.
- Bissonnette N, Angers DA, Simard RR et Lafond J. 2001. Interactive effects of management practices on water-stable aggregation and organic matter of a Humic Gleysol. *Canadian Journal of Soil Science*, 81 : 545-551.
- Booth MS, Stark JM et Rastetter E. 2005. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: A synthetic analysis of literature data. *Ecological Monographs*, 75 : 139-157.
- Brooks PD, Grogan P, Templer PH, Groffman P, Öquist MG et Schimel J. 2011. Carbon and nitrogen cycling in snow-covered environments. *Geography Compass*, 5 : 682-699.

Cambardella CA et Elliott ET. 1993. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 57 : 1071-1076.

Cookson WR, Murphy DV et Roper MM. 2008. Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 40 : 763-777.

Côté D. 2006. L'industrie agricole du Saguenay–Lac-Saint-Jean : 160 ans de montagnes russes. *Histoire Québec*, 12 : 22-28.

Davidson EA, Hart SC, Shanks CA et Firestone MK. 1991. Measuring gross nitrogen mineralization, immobilization and nitrification by ^{15}N isotopic pool dilution in intact soil cores. *Journal of Soil Science*, 42 : 335-349.

Diacono M et Montemurro F. 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30 : 401-422.

Environnement-Canada G. 2017. Archives nationales de données et d'information sur le climat. Consulté le 6 décembre,
http://climat.meteo.gc.ca/climate_data/daily_data_f.html?StationID=10872

Fageria NK. 2012. Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43 : 2063-2113.

Fang SZ, Xie BD et Zhang HC. 2007. Nitrogen dynamics and mineralization in degraded agricultural soil mulched with fresh grass. *Plant and Soil*, 300 : 269-280.

Francis GS, Haynes RJ et Knight TL. 1992. An overview of results from the long-term no-tillage trials at Winchmore. *Annual Conference of the Agronomy Society of New Zealand*, 22 : 97-101.

Franzluebbers AJ, Hons FM et Zuberer DA. 1994. Seasonal changes in soil microbial biomass and mineralizable C and N in wheat management systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 26 : 1469-1475.

Habteselassie MY, Stark JM, Miller BE, Thacker SG et Norton JM. 2006. Gross nitrogen transformations in an agricultural soil after repeated dairy-waste application. *Soil Science Society of America Journal*, 70 : 1338-1348.

Hart SC, Stark JM, Davidson EA et Firestone MK. 1994. Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification. Dans : *Methods of Soil Analysis Part 2 Microbiological and Biochemical Properties* (éd Weaver R). Soil Science Society of America, Inc. and American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wi. Série de livre no. 5., p. 985-1018.

Jabro JD, Sainju UM, Stevens WB, Lenssen AW et Evans RG. 2009. Long-term tillage influences on soil physical properties under dryland conditions in northeastern Montana. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 55 : 633-640.

Lafond J, Angers DA, Pageau D et Lajeunesse J. 2017. Sustainable cereal and forage production in dairy-based cropping systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 97 : 473-485.

Larsen J et Smith P. 2015. Un guide champ sur les stades de croissances des céréales. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario/Université de Guelph et Bayer CropScience, 27 p.

Maillard E, Angers DA, Chantigny M, Lafond J, Pageau D, Rochette P, Lévesque G, Leclerc ML et Parent LE. 2016. Greater accumulation of soil organic carbon after liquid dairy manure application under cereal-forage rotation than cereal monoculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 233 : 171-178.

MAPAQ. 2014. Portrait agroalimentaire 2010, Saguenay-LacSaint-Jean. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Saguenay-Lac-Saint-Jean Drd, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 26 p.

Mendez MJ et Buschiazzo DE. 2010. Wind erosion risk in agricultural soils under different tillage systems in the semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 106 : 311-316.

Morris NL, Miller PCH, Orson JH et Froud-Williams RJ. 2010. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment. A review. *Soil and Tillage Research*, 108 : 1-15.

N'Dayegamiye A. 2009. Soil properties and crop yields in response to mixed paper mill sludges, dairy cattle manure, and inorganic fertilizer application. *Agronomy Journal*, 101 : 826-835.

N'Dayegamiye A, Goulet M et Laverdière MR. 1997. Long-term mineral fertilizers and manure application on soil C and N distribution. *Canadian Journal of Soil Science*, 77 : 351-358.

Nyborg M, Solberg ED, Izaurrealde RC, Malhi SS et Molina-Ayala M. 1995. Influence of long-term tillage, straw and N fertilizer on barley yield, plant-N uptake and soil-N balance. *Soil and Tillage Research*, 36 : 165-174.

Odlare M, Pell M, Arthurson JV, Abubaker J et Nehrenheim E. 2014. Combined mineral N and organic waste fertilization-effects on crop growth and soil properties. *Journal of Agricultural Science*, 152 : 134-145.

Paré MC et Bedard-Haughn A. 2013. Surface Soil Organic Matter Qualities of Three Distinct Canadian Arctic Sites. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 45 : 88-98.

Paré MC, Lafond J et Pageau D. 2015. Best management practices in Northern agriculture: A twelve-year rotation and soil tillage study in Saguenay-Lac-Saint-Jean. *Soil & Tillage Research*, 150 : 83-92.

Phelan P, Moloney AP, McGeough EJ, Humphreys J, Bertilsson J, O'Riordan EG et O'Kiely P. 2015. Forage Legumes for Grazing and Conserving in Ruminant Production Systems. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34 : 281-326.

Raymond R, Mailloux A et Dubé A. 1965. Pédologie de la région du Lac-Saint-Jean. *Bulletin technique no. 11*. Ministère de l'Agriculture et de la Colonisation, Québec, Canada. 157 pp.

Recous S, Aita C et Mary B. 1998. In situ changes in gross N transformations in bare soil after addition of straw. *Soil Biology and Biochemistry*, 31 : 119-133.

Sbih M, N'Dayegamiye A et Karam A. 2003. Evaluation of carbon and nitrogen mineralization rates in meadow soils from dairy farms under transit to biological cropping systems. *Canadian Journal of Soil Science*, 83 : 25-33.

Six J, Bossuyt H, Degryze S et Denef K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79 : 7-31.

Tabi M, Tardif L, Carrier D, Laflamme G et Rompré M. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport synthèse. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Publication no. 910020., Bibliothèque nationale du Québec, 65 p.

Topp GC, Parkin GW et Ferré TPA. 2008. Soil Water Content, Gravimetric with oven drying. Dans : Carter MR et Gregorich EG éds. Soil Sampling and Methods of Analysis. CRC Press, Boca Raton, p. 939-961.

Valboa G, Lagomarsino A, Brandi G, Agnelli AE, Simoncini S, Papini R, Vignozzi N et Pellegrini S. 2015. Long-term variations in soil organic matter under different tillage intensities. Soil & Tillage Research, 154 : 126-135.

Van Eerd LL, Congreves KA, Hayes A, Verhallen A et Hooker DC. 2014. Long-term tillage and crop rotation effects on soil quality, organic carbon, and total nitrogen. Canadian Journal of Soil Science, 94 : 303-315.

Warkentin BP. 2001. The tillage effect in sustaining soil functions. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 164 : 345-350.

Wessen B et Berg B. 1986. Long-term decomposition of barley straw - chemical-changes and ingrowth of fungal mycelium. Soil Biology & Biochemistry, 18 : 53-59.

ANNEXE A – TABLEAUX D’ANOVA

Tableau 2. Analyse de la variance de la minéralisation brute de l’azote ($\text{mg N-NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$) dans une argile limoneuse (Gleysol humique) pour l’année 2015, 2016 et 2015 + 2016 pour les facteurs rotation de culture, travail du sol, fertilisation et date d’échantillonnages.

Facteurs	Minéralisation brute de l'azote ($\text{mg NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$)†		
	2015	2016	2015 + 2016
	Valeurs de F (Probabilité)		
RC ¹	12,9 (<0,001)	5,98 (0,018)	12,9 (<0,001)
TS ²	0,533 (0,469)	1,81 (0,185)	0,204 (0,652)
FT ³	4,99 (0,03)	8,51 (0,005)	10,6 (0,001)
DT ⁴	38,5 (<0,001)	0,001 (0,993)	1,27 (0,263)
RC x TS	4,12 (0,048)	0,004 (0,951)	1,81 (0,181)
TS x FT	3,61 (0,064)	2,64 (0,111)	0,003 (0,96)
FT x DT	2,39 (0,129)	0,907 (0,346)	0,276 (0,6)
RC x DT	1,17 (0,285)	0,02 (0,887)	0,278 (0,599)
TS x DT	0,05 (0,823)	1,76 (0,191)	1,5 (0,224)
RC x FT	1,03 (0,317)	3,23 (0,079)	2,86 (0,094)
TS x FT x DT	0,003 (0,956)	0,294 (0,59)	4,4 (0,038)
RC x FT x DT	5,44 (0,024)	1,73 (0,196)	0,459 (0,499)
RC x TS x DT	0,398 (0,531)	0,297 (0,588)	1,54 (0,218)
RC x TS x FT	0,081 (0,777)	1,72 (0,196)	0,439 (0,509)
RC x TS x FT x DT	0,016 (0,9)	1,05 (0,311)	1,18 (0,279)

†: normalisé par un $\log_{10}(x + 50)$

¹ RC: rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)]

² TS: travail du sol [chisel et charrue à versoir]

³ FT: fertilisation [organique et minéral]

⁴ DT: date d’échantillonnage [1er, 2e, 3e et 4e]
pour 2015 + 2016 [l’année 2015 et 2016]

Tableau 3. Analyse de la variance de la paille décomposée dans une argile limoneuse (Gleysol humique) pour l'année 2015, 2016 et 2015 + 2016 pour les facteurs rotation de culture, travail du sol, fertilisation et date d'échantillonnages.

Facteurs	Paille décomposée [†] pour l'année :		
	2015	2016	2015 + 2016
	Valeurs de F (Probabilité)		
RC ¹	14,6 (<0,001)	0,058 (0,809)	1,41 (0,237)
TS ²	0,696 (0,406)	0,744 (0,391)	0,474 (0,492)
FT ³	0,013 (0,91)	5,44 (0,022)	2,19 (0,141)
DT ⁴	92 (<0,001)	84,7 (<0,001)	109 (<0,001)
RC x TS	0,741 (0,391)	0,538 (0,465)	1,15 (0,284)
TS x FT	1,22 (0,272)	1,78 (0,185)	0,712 (0,4)
FT x DT	0,237 (0,917)	1,8 (0,154)	0,64 (0,59)
RC x DT	3,08 (0,019)	0,779 (0,509)	0,98 (0,403)
TS x DT	0,686 (0,603)	1,88 (0,139)	0,615 (0,606)
RC x FT	2,77 (0,099)	0,467 (0,496)	0,432 (0,512)
TS x FT x DT	1,28 (0,281)	1,93 (0,13)	0,459 (0,711)
RC x FT x DT	1,74 (0,147)	1,56 (0,205)	1,21 (0,306)
RC x TS x DT	3,38 (0,012)	1,4 (0,248)	0,413 (0,744)
RC x TS x FT	0,032 (0,858)	0,621 (0,433)	2,07 (0,151)
RC x TS x FT x DT	1,79 (0,136)	0,108 (0,955)	0,095 (0,963)

†: normalisé par un $\log_{10}(x + 50)$

¹ RC: rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)]

² TS: travail du sol [chisel et charrue à versoir]

³ FT: fertilisation [organique et minéral]

⁴ DT: date d'échantillonnage [1er, 2e, 3e et 4e]

Tableau 4. Analyse de la variance de la masse de carbone décomposée de la paille dans une argile limoneuse (Gleysol humique) pour l'année 2015, 2016 et 2015 + 2016 pour les facteurs rotation de culture, travail du sol, fertilisation et date d'échantillonnages.

Facteurs	Carbone décomposé de la paille† pour l'année :		
	2015	2016	2015 + 2016
	Valeurs de F (Probabilité)		
RC ¹	8,15 (0,005)	2,1 (0,151)	1,63 (0,203)
TS ²	0,24 (0,625)	0,007 (0,932)	0,045 (0,832)
FT ³	1,85 (0,177)	3,33 (0,071)	0,46 (0,498)
DT ⁴	90,1 (<0,001)	23,8 (<0,001)	52,2 (<0,001)
RC x TS	3,24 (0,074)	0,164 (0,686)	0,374 (0,541)
TS x FT	2,11 (0,149)	2,13 (0,147)	0,482 (0,488)
FT x DT	0,439 (0,781)	1,29 (0,284)	1,26 (0,288)
RC x DT	4,33 (0,003)	0,398 (0,754)	0,316 (0,814)
TS x DT	0,33 (0,857)	1,91 (0,133)	0,438 (0,726)
RC x FT	2,1 (0,15)	1,13 (0,291)	0,687 (0,408)
TS x FT x DT	1,8 (0,133)	2,51 (0,063)	1,51 (0,212)
RC x FT x DT	1,02 (0,398)	1,82 (0,149)	0,746 (0,526)
RC x TS x DT	0,882 (0,477)	0,748 (0,526)	0,147 (0,932)
RC x TS x FT	0,161 (0,689)	2,42 (0,123)	3,94 (0,048)
RC x TS x FT x DT	2,67 (0,036)	0,15 (0,929)	0,191 (0,903)

†: normalisé par un $\log_{10}(x + 50)$

¹ RC: rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)]

² TS: travail du sol [chisel et charrue à versoir]

³ FT: fertilisation [organique et minéral]

⁴ DT: date d'échantillonnage [1er, 2e, 3e et 4e]

Tableau 5. Analyse de la variance de la masse d'azote décomposée de la paille dans une argile limoneuse (Gleysol humique) pour l'année 2015, 2016 et 2015 + 2016 pour les facteurs rotation de culture, travail du sol, fertilisation et date d'échantillonnages.

Facteurs	Azote décomposé de la paille† pour l'année :		
	2015	2016	2015 + 2016
	Valeurs de F (Probabilité)		
RC ¹	4,1 (0,045)	6,66 (0,011)	2,7 (0,102)
TS ²	2,55 (0,113)	8,11 (0,005)	13,2 (<0,001)
FT ³	0,008 (0,931)	0,873 (0,352)	0,095 (0,758)
DT ⁴	12,9 (<0,001)	5,74 (0,001)	3,36 (0,02)
RC x TS	1,44 (0,232)	0,068 (0,794)	0,974 (0,325)
TS x FT	12,6 (<0,001)	1,19 (0,279)	1,24 (0,27)
FT x DT	1,81 (0,131)	1,34 (0,266)	0,63 (0,597)
RC x DT	2,77 (0,031)	4,16 (0,008)	3,84 (0,01)
TS x DT	2,7 (0,034)	1,69 (0,174)	0,858 (0,464)
RC x FT	1,6 (0,208)	0,2 (0,656)	0,27 (0,604)
TS x FT x DT	1,87 (0,121)	3,08 (0,031)	2,26 (0,082)
RC x FT x DT	0,447 (0,774)	0,379 (0,769)	0,157 (0,925)
RC x TS x DT	0,249 (0,91)	0,996 (0,398)	0,451 (0,717)
RC x TS x FT	0,414 (0,521)	0,749 (0,389)	0,3 (0,584)
RC x TS x FT x DT	2,8 (0,029)	0,091 (0,965)	2,27 (0,081)

†: normalisé par un $\log_{10}(x + 50)$

¹ RC: rotation de culture [céréale continue (CC) et céréale grainée (CG)]

² TS: travail du sol [chisel et charrue à versoir]

³ FT: fertilisation [organique et minéral]

⁴ DT: date d'échantillonnage [1er, 2e, 3e et 4e]

ANNEXE B – FIGURES DE MÉTÉO À NORMANDIN

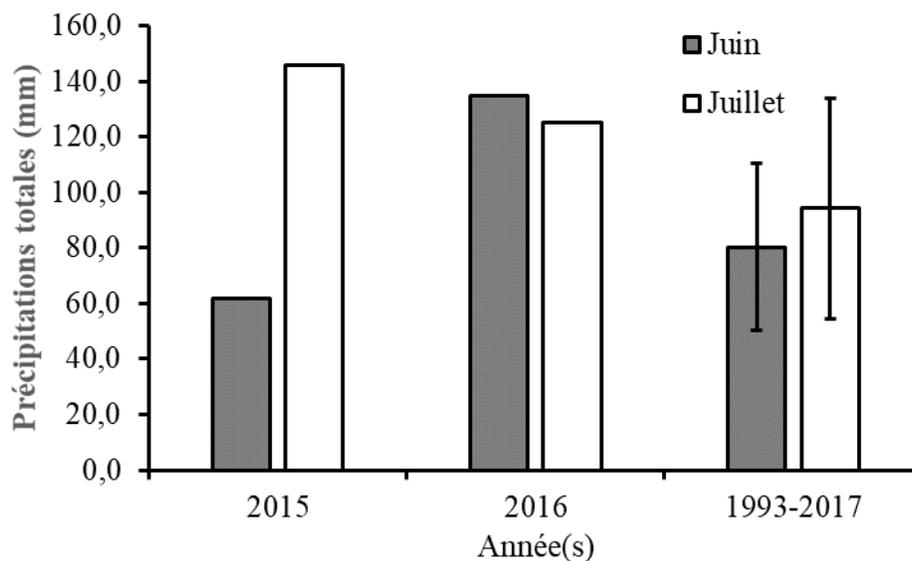


Figure 18. Précipitations à la Ferme de recherche de Normandin en 2015, 2016 et la moyenne des années de 1993 à 2017 pour les mois de juin et de juillet (Environnement-Canada 2017).

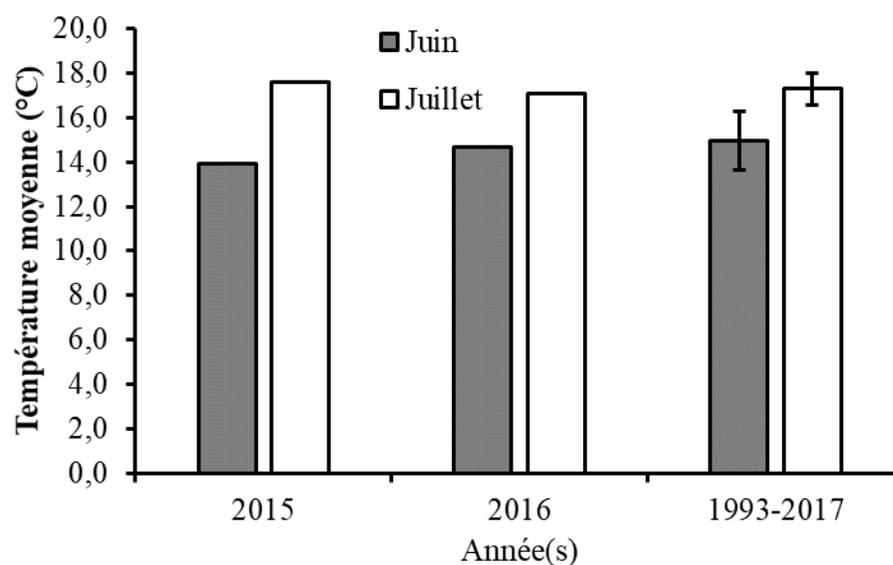


Figure 19. Température moyenne à la Ferme de recherche de Normandin en 2015, 2016 et la moyenne des années de 1993 à 2017 pour les mois de juin et de juillet (Environnement-Canada 2017).