



## Utilisation de l'indice de nutrition azoté pour optimiser la fertilisation dans le maïs fourrager et les prairies de graminées

Rapport Saison 2015-2017

Rédigé par :

Stéphanie Durand, agr. Isabelle Breune, agr. M. Sc. Gaétan Parent, agr. M. Sc. M.B.A.

Et

Luc Belzile, agr., économiste, M.Sc.e pour la section économique

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent de l'auteur ou des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

<b>Responsables</b>	<p><b>Isabelle Breune, agr. M. Sc.</b>          Agente en transfert, Centre de recherche et de développement de Sherbrooke,          Agriculture et Agroalimentaire Canada</p> <p><b>Stéphanie Durand, agr.</b>          Conseillère, Club agroenvironnemental de l'Estrie</p> <p><b>Gaétan Parent, agr. M. Sc. M.B.A.</b>          Spécialiste principal des ressources en sols, Direction Générale des Sciences et          de la Technologie, Agriculture et Agroalimentaire Canada</p>
<b>Collaborateurs</b>	<p><b>Gilles Bélanger, D.Sc.</b>          Chercheur scientifique, Direction générale des sciences et de la technologie          Agriculture et Agroalimentaire Canada</p> <p><b>Noura Ziadi, Ph.D</b>          Chercheur scientifique, Direction générale des sciences et de la technologie,          Agriculture et Agroalimentaire Canada</p>
<b>Soutien financier</b>	<p>Ce projet a été réalisé en vertu du volet 4 du programme Prime-Vert 2013-2018 et il a bénéficié d'une aide financière du ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) par l'entremise du Fonds vert.</p>
<b>Remerciements</b>	<p>Merci à Juliette Lévesque, Krystal Coddington, Nathalie Hallé, Daniève Durocher, Émilie Bernier, Geneviève Régimbald et Antoine Rhéaume du Club pour leur aide. Merci à Laurent Tremblay, producteur, Sylvie Michaud (AAC), Jean-Marie Lefebvre (Synagri), Valérie Charest (Stagiaire AAC) pour leur participation.</p> <p>Merci à Jean Pierre Charuest, Étienne Viens, Dominique Gagnon et le personnel de l'équipe des grandes cultures du Centre de recherche et de développement de Sherbrooke, Agriculture et Agroalimentaire Canada</p>
<b>Crédit photo</b>	<p>Les photos ont été prises par Stéphanie Durand, Isabelle Breune, Juliette Lévesque, Valérie Charest et Krystal Coddington.</p>

# Table des matières

---

AVANT PROPOS .....	8
INDICE DE NUTRITION AZOTÉ .....	9
1. ESSAIS DANS LES PRAIRIES DE GRAMINÉES .....	11
1.1. DESCRIPTION DES PROTOCOLES .....	11
1.2 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS .....	15
1.2.1. RÉSULTATS EN 2015 .....	16
1.2.2. RÉSULTATS EN 2016 .....	21
1.2.3. RÉSULTATS EN 2017 .....	27
1.3 ANALYSE DES RÉSULTATS .....	32
1.3.1 ANALYSE DES RENDEMENTS .....	32
1.3.2 ANALYSE DU CONTENU EN PROTÉINE BRUTE ET EXPORTATION D'AZOTE PAR LA RÉCOLTE .....	35
1.3.2.1 CONTENU EN PROTÉINE BRUTE .....	35
1.3.2.3 PRÉLÈVEMENT D'AZOTE PAR LA RÉCOLTE .....	41
1.3.3 BILAN AZOTÉ ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL .....	43
1.3.4 IMPACT SUR LES GAZ À EFFET DE SERRE .....	49
1.3.4.1 SCÉNARIO 1. RÉFÉRENCE POUR UNE PRAIRIE DE 100 HA (3 COUPES) AVEC UN APPORT DE 160 KG N/HA D'AZOTE.....	50
1.3.4.2 SCÉNARIO 2. RÉFÉRENCE POUR UNE PRAIRIE DE 100 HA (3 COUPES) AVEC UN APPORT DE 224 KG N/HA D'AZOTE.....	52
1.3.4.3 SCÉNARIO 3. RÉFÉRENCE POUR UNE PRAIRIE DE 60 HA (3 COUPES) AVEC UN APPORT DE 224 KG N/HA D'AZOTE.....	53
1.3.4.4 COMPARAISON DE LA PRODUCTION ET DE LA SÉQUESTRATION DES GAZ À EFFET DE SERRE SELON LES TROIS SCÉNARIOS .....	54
1.3.5 INDICE DE NUTRITION AZOTÉ.....	55
1.3.5.1. UTILISATION DE L'INA MESURÉ AVANT LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE POUR DÉTERMINER LES BESOINS EN AZOTE DE LA 2 <sup>ÈME</sup> COUPE .....	55
1.3.5.2. UTILISATION DE L'INA MESURÉ AVANT LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE POUR VALIDER LA FERTILISATION AZOTÉE DES PRAIRIES .....	62
1.3.6 ANALYSE ÉCONOMIQUE.....	66
1.3.6.1. CONTEXTE .....	66
1.3.6.2. MÉTHODE .....	66
1.3.6.3. RÉSULTATS .....	68
1.3.6.4. DISCUSSION ET CONCLUSION. ....	69

1.4 CONCLUSION .....	73
2. ESSAIS DANS LE MAÏS FOURRAGER .....	75
2.1. DESCRIPTION DES PROTOCOLES .....	75
2.2. RÉSULTATS .....	80
2.2.1. RÉSULTATS EN 2015 .....	80
2.2.2. RÉSULTATS EN 2016 .....	81
2.2.3. RÉSULTATS EN 2017 .....	83
2.3 ANALYSE DES RÉSULTATS .....	86
2.3.1 ANALYSE DES RENDEMENTS .....	86
2.3.2 ANALYSE DU CONTENU EN PROTÉINE BRUTE ET EXPORTATION D'AZOTE PAR LA RÉCOLTE .....	88
2.3.2.1 CONTENU EN PROTÉINE BRUTE .....	88
2.3.2.2 PRÉLÈVEMENT D'AZOTE PAR LA RÉCOLTE .....	89
2.3.3 BILAN AZOTÉ ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL .....	91
2.3.4 IMPACT SUR LES GAZ À EFFET DE SERRE .....	92
2.3.4.1 SCÉNARIO 1. RÉFÉRENCE POUR DU MAÏS CULTIVÉ SUR 100 HA AVEC UN APPORT DE 160 KG N/HA D'AZOTE.....	93
2.3.4.2 SCÉNARIO 2. POUR DU MAÏS CULTIVÉ SUR 100 HA AVEC UN APPORT DE 80 KG N/HA D'AZOTE.....	94
2.3.4.4 COMPARAISON DE LA PRODUCTION SELON LES SCÉNARIOS .....	94
2.3.5 INDICE DE NUTRITION AZOTÉ.....	95
2.4 CONCLUSION .....	99
3 ACTIVITÉS DE DIFFUSIONS .....	100
RÉFÉRENCES .....	101
ANNEXE 1 DESCRIPTION DES SITES EN PRAIRIES.....	103
ANNEXE 2 DESCRIPTION DES SITES EN MAÏS.....	113
ANNEXE3 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES À LENNOXVILLE .....	128
ANNEXE 4 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES À HONFLEUR .....	137
ANNEXE 5 ANALYSE STATISTIQUE POUR LES PRAIRIES.....	143
ANNEXE 6 ANALYSE STATISTIQUE DU MAÏS.....	143
3.ACTIVITÉS DE DIFFUSIONS.....	75

# Table des illustrations

FIGURE 1. RENDEMENT DE LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE SELON L'AZOTE APPORTÉ AU PRINTEMPS (MOYENNE DES DEUX SITES EN ESTRIE) EN 2015.....	18
FIGURE 2. RENDEMENT DES COUPES 1 ET 2 SELON L'AZOTE APPORTÉ (AU PRINTEMPS ET APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE) (MOYENNE DES DEUX SITES EN ESTRIE) EN 2015 .....	19
FIGURE 3. RENDEMENT DES 3 COUPES SELON L'AZOTE APPORTÉ (AU PRINTEMPS ET APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> ET LA 2 <sup>ÈME</sup> COUPE) (MOYENNE DES DEUX SITES EN ESTRIE) EN 2015 .....	20
FIGURE 4. RENDEMENT DE LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE SELON L'AZOTE APPORTÉ AU PRINTEMPS (MOYENNE DES QUATRE SITES) EN 2016 .....	24
FIGURE 5. RENDEMENT DES COUPES 1 ET 2 SELON L'AZOTE APPORTÉ (AU PRINTEMPS ET APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE) (MOYENNE DES QUATRE SITES) EN 2016.....	25
FIGURE 6. RENDEMENT DES 3 COUPES SELON L'AZOTE APPORTÉ (AU PRINTEMPS ET APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> ET LA 2 <sup>ÈME</sup> COUPE) (MOYENNE DES QUATRE SITES) EN 2016.....	26
FIGURE 7. RENDEMENT DE LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE SELON L'AZOTE APPORTÉ AU PRINTEMPS EN 2017.....	30
FIGURE 8. RENDEMENT DES COUPES 1 ET 2 SELON L'AZOTE APPORTÉ (AU PRINTEMPS ET APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE) EN 2017	31
FIGURE 9. RENDEMENT DES 3 COUPES SELON L'AZOTE APPORTÉ (AU PRINTEMPS ET APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> ET LA 2 <sup>ÈME</sup> COUPE) (MOYENNE DE TROIS SITES, PAS DE 3 <sup>ÈME</sup> COUPE À VAL-JOLI) EN 2017 .....	32
FIGURE 10. RENDEMENT EN MATIÈRE SÈCHE OBTENUS SELON L'AZOTE APPORTÉ (AU PRINTEMPS ET APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> ET LA 2 <sup>ÈME</sup> COUPE) POUR UNE RÉGIE À UNE COUPE, DEUX COUPES OU TROIS COUPES DURANT LES 3 ANNÉES DU PROJET .....	33
FIGURE 11. CONCENTRATION EN NITRATES DU FOIN DE GRAMINÉES À LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE SELON LES APPORTS DE FERTILISANTS AZOTÉS (SOURCE : GAGNON ET COLL. 2017).....	36
FIGURE 12. CONCENTRATION EN NITRATES DU FOIN DE GRAMINÉES À LA 2 <sup>ÈME</sup> COUPE SELON LES APPORTS DE FERTILISANTS AZOTÉS (SOURCE : GAGNON ET COLL. 2017).....	37
FIGURE 13. CONTENU MOYEN EN PROTÉINE BRUTE (TOUS LES SITES) DE LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE SELON L'AZOTE APPORTÉ AU PRINTEMPS DURANT LES 3 ANNÉES DU PROJET.....	38
FIGURE 14. CONTENU MOYEN EN PROTÉINE BRUTE (TOUS LES SITES) DE LA 2 <sup>ÈME</sup> COUPE SELON L'AZOTE APPORTÉ AU PRINTEMPS ET APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE DURANT LES 3 ANNÉES DU PROJET.....	39
FIGURE 15. CONTENU MOYEN EN PROTÉINE BRUTE (TOUS LES SITES) DE LA 3 <sup>ÈME</sup> COUPE SELON L'AZOTE APPORTÉ AU PRINTEMPS ET APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE DURANT LES 3 ANNÉES DU PROJET.....	40
FIGURE 16. PRÉLÈVEMENT D'AZOTE PAR LA RÉCOLTE (1 <sup>ÈRE</sup> COUPE) SELON L'AZOTE APPORTÉ AU PRINTEMPS .....	42
FIGURE 17. PRÉLÈVEMENT D'AZOTE PAR LES RÉCOLTES (1 <sup>ÈRE</sup> ET 2 <sup>ÈME</sup> COUPE) SELON L'AZOTE TOTAL APPORTÉ.....	42
FIGURE 18. PRÉLÈVEMENT D'AZOTE PAR LES RÉCOLTES (TROIS COUPES) SELON L'AZOTE TOTAL APPORTÉ.....	43
FIGURE 19. BILAN AZOTÉ (1 <sup>ÈRE</sup> COUPE) SELON L'AZOTE TOTAL APPORTÉ .....	44
FIGURE 20. BILAN AZOTÉ (1 <sup>ÈRE</sup> ET 2 <sup>ÈME</sup> COUPES) SELON L'AZOTE TOTAL APPORTÉ .....	45
FIGURE 21. BILAN AZOTÉ (1 <sup>ÈRE</sup> , 2 <sup>ÈME</sup> ET 3 <sup>ÈME</sup> COUPES) SELON L'AZOTE TOTAL APPORTÉ .....	46
FIGURE 22. UTILISATION APPARENTE DE L'AZOTE SELON L'AZOTE TOTAL APPORTÉ .....	46
FIGURE 23. POINT DE L'ÉCODISTRICT # 483. ....	49
FIGURE 24. CARACTÉRISTIQUE DE LA FERME RETENUE POUR LES SCÉNARIOS. SOURCE : HOLOS, VERSION 3.0.3 SEPTEMBRE 2017. ....	50
FIGURE 25. CONCENTRATION EN AZOTE ET EN PHOSPHORE SELON LE RENDEMENT EN MATIÈRE SÈCHE DE LA FLÉOLE (1 <sup>ÈRE</sup> COUPE) DANS DES CONDITIONS DE CROISSANCE NON LIMITANTES EN AZOTE (120 KG N/HA) ET EN PHOSPHORE. SOURCE : BÉLANGER ET COLL. 2008. ....	56
FIGURE 26. AUGMENTATION DU RENDEMENT À LA DEUXIÈME COUPE EN 2016 SELON L'INA DE LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE POUR UN APPORT ENTRE 25 ET 50 KG N/HA APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE .....	61

FIGURE 27.	AUGMENTATION DU RENDEMENT À LA DEUXIÈME COUPE EN 2016 SELON L'INA DE LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE POUR UN APPORT ENTRE 50 ET 75 KG N/HA APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE .....	61
FIGURE 28.	AUGMENTATION DU RENDEMENT À LA DEUXIÈME COUPE EN 2016 SELON L'INA DE LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE POUR UN APPORT ENTRE 50 ET 75 KG N/HA APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE .....	62
FIGURE 29.	INTERPRÉTATION DES VALEURS DE L'INA.....	63
FIGURE 30.	RELATION ENTRE LES DOSES D'AZOTES APPORTÉES AU PRINTEMPS, L'INA ET LE RENDEMENT EN MATIÈRE SÈCHE DU FOIN .....	65
FIGURE 31.	RENDEMENT EN MAÏS, PLANTE ENTIÈRE (KG M.S./HA) .....	87
FIGURE 32.	CONTENU EN PROTÉINE BRUTE DU MAÏS PLANTE ENTIÈRE À LA RÉCOLE (%) .....	88
FIGURE 33.	PRÉLÈVEMENT D'AZOTE AU STADE V6 (2015) ET V8 (2016-2017) EN KG N/HA(MOYENNE DE CHAQUE TRAITEMENT SUR CHAQUE SITE) .....	89
FIGURE 34.	PRÉLÈVEMENT D'AZOTE À LA RÉCOLTE EN KG N/HA (MOYENNE DE CHAQUE TRAITEMENT SUR CHAQUE SITE) .....	90
FIGURE 35.	BILAN AZOTÉ À LA RÉCOLTE DU MAÏS PLANTE ENTIÈRE SUR CHAQUE SITE À CHAQUE ANNÉE EN KG N/HA ..	91
FIGURE 36.	BILAN AZOTÉ À LA RÉCOLTE DU MAÏS PLANTE ENTIÈRE SUR 3 ANS EN KG N/HA.....	92
FIGURE 37.	CONCENTRATION CRITIQUE EN AZOTE EN FONCTION DE LA BIOMASSE. SOURCE ZIADI ET COLL. 2008.....	96
FIGURE 38.	RENDEMENT DU MAÏS PLANTE ENTIÈRE EN FONCTION DE L'INA MESURÉ AU STADE V6 À V8.....	97
FIGURE 39.	RENDEMENT DU MAÏS PLANTE ENTIÈRE EN FONCTION DE L'INA MESURÉ AU STADE V6 À V8 EN 2017.....	98
FIGURE 40.	INTERPRÉTATION DES VALEURS DE L'INA.....	99

# Table des tableaux

---

TABLEAU 1. PROTOCOLE DE FERTILISATION DANS LES PRAIRIES EN 2015 .....	11
TABLEAU 2. PROTOCOLE DE FERTILISATION DANS LES PRAIRIES EN 2016 .....	11
TABLEAU 3. PROTOCOLE DE FERTILISATION DANS LES PRAIRIES EN 2017 .....	12
TABLEAU 4. RÉSULTATS DU SUIVI DES PRAIRIES DE GRAMINÉES, SUR DEUX SITES EN ESTRIE EN 2015. ....	16
TABLEAU 5. RÉSULTATS DU SUIVI DES PRAIRIES DE GRAMINÉES, SUR QUATRE SITES ( 2 EN ESTRIE ET 2 EN BEAUCE) EN 2016.....	21
TABLEAU 6. RÉSULTATS DU SUIVI DES PRAIRIES DE GRAMINÉES, SUR QUATRE SITES ( 2 EN ESTRIE ET 2 EN BEAUCE) EN 2017.....	27
TABLEAU 7. UTILISATION APPARENTE DE L'AZOTE SELON L'AZOTE TOTAL APPORTÉ (HALL ET COLL. 2013) .....	48
TABLEAU 8. CARACTÉRISTIQUE D'UNE PRAIRIE (3 COUPES) POUR LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE AVEC 160 KG N/HA D'AZOTE. SOURCE : HOLOS, VERSION 3.0.3 SEPTEMBRE 2017. ....	51
TABLEAU 9. CARACTÉRISTIQUE D'UNE PRAIRIE 3 COUPES POUR LE SCÉNARIO AUGMENTÉ AVEC 224 KG N/HA D'AZOTE (100 HA). SOURCE : HOLOS, VERSION 3.0.3 SEPTEMBRE 2017. ....	52
TABLEAU 10. CARACTÉRISTIQUE D'UNE PRAIRIE 3 COUPES POUR LE SCÉNARIO AUGMENTÉ AVEC 224 KG N/HA D'AZOTE (60 HA). SOURCE : HOLOS, VERSION 3.0.3 SEPTEMBRE 2017 .....	53
TABLEAU 11. RÉSUMÉ DES ÉMISSIONS EN ÉQUIVALENT CO <sub>2</sub> POUR UNE PRAIRIE DE GRAMINÉE FERTILISÉE AVEC DIFFÉRENTS TAUX D'AZOTE (3 COUPES) ET SELON DIFFÉRENTES SUPERFICIES SOURCE : HOLOS, VERSION 3.0.3 SEPTEMBRE 2017 .....	55
TABLEAU 12. AUGMENTATION DU RENDEMENT À LA DEUXIÈME COUPE EN 2016 SELON L'INA DE LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE POUR UN APPORT ENTRE 25 ET 50 KG N/HA APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE.....	58
TABLEAU 13. AUGMENTATION DU RENDEMENT À LA DEUXIÈME COUPE EN 2016 SELON L'INA DE LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE POUR UN APPORT ENTRE 50 ET 75 KG N/HA APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE.....	59
TABLEAU 14. AUGMENTATION DU RENDEMENT À LA DEUXIÈME COUPE EN 2017 SELON L'INA DE LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE POUR UN APPORT ENTRE 50 ET 75 KG N/HA APRÈS LA 1 <sup>ÈRE</sup> COUPE.....	60
TABLEAU 15. PRIX DES ENGRAIS MINÉRAUX AZOTÉS AU QUÉBEC (EXPRIMÉS EN \$/KG D'AZOTE), 2013-2017. ....	68
TABLEAU 16. DOSE ÉCONOMIQUE OPTIMALE, COÛT DE FERTILISATION MINÉRALE AZOTÉE ET MAXIMISATION DU PROFIT À L'ÉGARD DE LA FERTILISATION AZOTÉE DES PRAIRIES ET À DEUX COUPES DE RÉCOLTE .....	72
TABLEAU 16. PROTOCOLE DE FERTILISATION DES PARCELLES DE MAÏS EN 2015.....	75
TABLEAU 17. PROTOCOLE DE FERTILISATION DANS LE MAÏS EN 2016 .....	76
TABLEAU 18. PROTOCOLE DE FERTILISATION DANS LE MAÏS EN 2017 .....	77
TABLEAU 19. RÉSULTATS DU SUIVI DU MAÏS ENSILAGE, SUR DEUX SITES EN ESTRIE EN 2015.....	80
TABLEAU 20. RÉSULTATS DU SUIVI DU MAÏS ENSILAGE, SUR QUATRE SITES EN 2016 .....	81
TABLEAU 21. RÉSULTATS DU SUIVI DU MAÏS ENSILAGE, SUR QUATRE SITES EN 2017 .....	83
TABLEAU 22. RÉSUMÉ DES CONDITIONS DES SITES À L'ESSAI DANS LE MAÏS.....	86
TABLEAU 23. CARACTÉRISTIQUE DU MAÏS POUR LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE AVEC 160 KG N/HA D'AZOTE. SOURCE : HOLOS, VERSION 3.0.3 SEPTEMBRE 2017. ....	93
TABLEAU 24. CARACTÉRISTIQUE DU MAÏS POUR LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE AVEC 80 KG N/HA D'AZOTE. SOURCE : HOLOS, VERSION 3.0.3 SEPTEMBRE 2017. ....	94
TABLEAU 25. RÉSUMÉ DES ÉMISSIONS EN ÉQUIVALENT CO <sub>2</sub> POUR DU MAÏS CULTIVÉ SUR 100 HA SELON DIFFÉRENTS TYPES DE TRAVAIL DE SOL ET DIFFÉRENTS NIVEAUX D'AZOTE. SOURCE : HOLOS, VERSION 3.0.3 SEPTEMBRE 2017.....	95

# Avant-propos

---

Les pratiques qui permettent d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre visent une bonne pratique de gestion des sols (augmentation de la matière organique, amélioration de la structure) et optimisation des fertilisants azotés (fumier, lisier engrais). En 2003, selon le ministère de l'environnement, l'agriculture produisait environ 10 % des gaz à effet de serre (MENV, 2003) sous forme de méthane, protoxyde d'azote et de gaz carbonique. Le protoxyde d'azote représente 36 % des gaz à effet de serre émis. Afin de réduire l'émission de protoxyde d'azote, il faut améliorer la gestion des fumiers, lisiers, engrais azotés, des engrais verts et du drainage des sols (Rochette et al.). Au Québec, la gestion de la fertilisation azotée dans le maïs fourrager et les prairies pourrait être optimisée sur bon nombre d'entreprises agricoles. La dynamique de l'azote, même si elle est assez bien connue, demeure relativement imprévisible par sa dépendance aux conditions climatiques. Ainsi, un haut facteur de sécurité est appliqué lors de la recommandation des doses de fertilisants (Cantin, 2007). Une meilleure gestion des doses d'azote permettrait à la fois de réduire le potentiel de production d'oxyde nitreux (gaz à effet de serre) et également le lessivage des nitrates vers les cours d'eau. Au niveau de la recherche, M. Gilles Bélanger et Mme Noura Ziadi (chercheurs à Agriculture et Agroalimentaire Canada) ont travaillé sur l'utilisation de l'analyse du contenu en azote du maïs et des graminées fourragères (indice de nutrition azoté) comme outil permettant d'établir si la plante est sur ou sous-fertilisée en azote.

L'objectif de ce projet était de :

- Valider si l'indice de nutrition azoté est un outil qui pourrait être utilisé par les conseillers agricoles de la région pour ajuster les doses d'azote chez les producteurs de maïs fourrager et de fourrage.
- Sensibiliser les conseillers et les producteurs agricoles aux conséquences de la sur-fertilisation azotée du maïs fourrager et des prairies de graminées sur les gaz à effet de serre.

Pour ce faire, des essais de fertilisation ont été réalisés durant 3 ans dans des champs de maïs fourrager et de prairies de graminées directement sur des fermes en production.

Une analyse économique a été réalisée afin de trouver les doses optimales de fertilisants azotés. Cette analyse de rentabilité a été réalisée par l'équipe en économie de l'agroenvironnement de l'IRDA.

## Indice de nutrition azoté

---

Les chercheurs Gilles Bélanger et Noura Ziadi d'AAC ont développé au cours des 15 dernières années des modèles simples permettant de connaître la concentration critique en azote (Nc) du maïs et de la fléole. Cette concentration correspond au niveau d'azote qui est nécessaire pour obtenir une croissance maximale des plantes (Bélanger et Richards, 1997; Bélanger et Ziadi, 2008; Ziadi et *al.*, 2008). Ces modèles sont basés sur le processus de dilution de l'azote dans une biomasse croissante. Ils sont adaptés aux conditions de l'Est du Canada. Les concentrations critiques en azote, de la plante entière, obtenus à partir des modèles, permettent de calculer un indice de nutrition azotée des cultures. Cet indice offre un diagnostic fiable de la nutrition azotée des cultures annuelles et pérennes.

La concentration critique en azote (Nc) varie donc avec le niveau de biomasse en matière sèche (MS). Les modèles suivants ont ainsi été validés:

- Pour une prairie de graminée de 4 ans et moins :  $Nc = 48,0 \times MS^{-0,32}$   
où 48 est à la concentration critique en azote exprimée en g kg<sup>-1</sup> MS (ou 4,8 %) pour une biomasse en matière sèche accumulée de 1 T/ha (Bélanger et Ziadi, 2008) et 0,32 est le coefficient de dilution.
- Pour une prairie graminée de plus de 4 ans :  $Nc = 37,0 \times MS^{-0,35}$   
où 37 est à la concentration critique en azote exprimée en g kg<sup>-1</sup> MS (ou 3,7%) pour une biomasse en matière sèche accumulée de 1 T/ha (Bélanger et Ziadi, 2008) et 0,35 est le coefficient de dilution.
- Pour le maïs :  $Nc = 34,0 \times MS^{-0,37}$  où 34 est à la concentration critique en azote exprimée en g kg<sup>-1</sup> MS (ou 3,4 %) pour une biomasse en matière sèche accumulée de 1 T/ha (Ziadi et *al.*, 2008) et 0,37 est le coefficient de dilution.

Le niveau de nutrition azotée de la culture est ensuite calculé en divisant la concentration en azote contenu dans la culture à un moment donné par la concentration critique prédite par les modèles. On obtient ainsi l'indice de nutrition azotée (INA = N/Nc). Les recherches ont démontré que l'indice de nutrition azoté (INA) au stade V12 du maïs permet d'évaluer le statut nutritionnel de celui-ci durant la saison de croissance (Ziadi et *al.*, 2008). De même, le statut nutritionnel des jeunes et des vieilles prairies de fléole des prés peut être déterminé à partir des concentrations critiques déterminées, au plus tôt, au début montaison (minimum 1 T de matière sèche). (Bélanger et Ziadi, 2008). L'INA permet de déterminer s'il est possible ou non d'avoir une réponse positive du rendement à une application additionnelle d'azote. Si l'INA est inférieur à 1,0, les cultures devraient répondre positivement à la fertilisation azotée, alors que si l'INA est supérieur à 1,0, il ne devrait pas y avoir de réponse.

De par sa dépendance aux conditions pédoclimatiques, la dynamique de l'azote est relativement imprévisible à chaque année. Ainsi, il serait intéressant de pouvoir utiliser l'INA à priori c'est à dire tôt en saison pour ajuster les doses d'azote en post-levée dans le maïs et entre chaque coupe de graminées fourragères. Ainsi, dans le maïs, il faudrait être en mesure d'établir l'INA au stade V8 au lieu du stade V12. Ainsi, la fenêtre sera suffisante pour ajuster la fertilisation azotée en post-levée avant que les épandeurs traditionnels ne puissent plus passer dans les champs, sans endommager les plants. Dans les prairies de graminées, cette technique ne peut être utilisée suffisamment tôt au printemps pour ajuster la fertilisation avant la 1<sup>ère</sup> coupe (manque de biomasse). Par contre, elle pourrait, peut-être, être utilisée pour ajuster les besoins de la deuxième coupe et des coupes suivantes en établissant l'INA juste avant la 1<sup>ère</sup> coupe.

L'INA permet également d'établir un portrait de la nutrition azotée des cultures a posteriori. Ainsi, s'il est calculé sur quelques années, ce portrait peut permettre à un producteur agricole d'établir si, de manière générale, il fournit trop ou pas assez d'azote à ses cultures pour obtenir un rendement optimal. Il peut de cette façon ajuster sa fertilisation à la hausse ou à la baisse.

# 1. Essais dans les prairies de graminées

---

## 1.1. Description des protocoles

Les essais de fertilisation azotée des prairies ont été conduits durant 3 années consécutives de 2015 à 2018.

En 2015, il y avait deux sites d'essais en Estrie, sur une ferme à Val-Joli et sur la ferme du Centre de Recherche et développement de Sherbrooke (CDRS) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Un protocole en bloc complet (les blocs étaient perpendiculaires à la pente la plus forte) a été mis en place avec 4 répétitions. Les traitements étaient les suivants :

**Tableau 1. Protocole de fertilisation dans les prairies en 2015**

	Printemps	Après 1ère coupe	Après 2ème coupe	Total
	Kg N/ha			
T1	0	25	25	<b>50</b>
T2	25	25	25	<b>75</b>
T3	0	50	50	<b>100</b>
T4	50	50	50	<b>150</b>
T5	75	50	50	<b>175</b>

En 2016, il y avait deux sites d'essais en Estrie, sur la même ferme à Val-Joli et sur la ferme du CDRS ainsi que deux sites en Beauce, sur une ferme à Saint-Narcisse et une ferme à Saint-Isidore. Un protocole en bloc complet (les blocs étaient perpendiculaires à la pente la plus forte) a été mis en place avec 3 répétitions. Comme en 2015, nous n'avions pas obtenus de rendement optimal avec les doses retenues, les traitements ont été modifiés de la façon suivante :

**Tableau 2. Protocole de fertilisation dans les prairies en 2016**

	Printemps	Après 1ère coupe	Après 2ème coupe	Total
	Kg N/ha			
T1	0	0	0	<b>0</b>
T2	25	25	25	<b>75</b>
T3	50	25	25	<b>100</b>
T4	50	50	50	<b>150</b>
T5	75	25	25	<b>125</b>
T6	75	50	50	<b>175</b>
T7	75	75	75	<b>225</b>

	Printemps	Après 1ère coupe	Après 2ème coupe	Total
	Kg N/ha			
T8	100	25	25	<b>150</b>
T9	100	50	50	<b>200</b>
T10	100	75	75	<b>250</b>
T11	125	25	25	<b>175</b>
T12	125	50	50	<b>225</b>
T13	125	75	75	<b>275</b>

En 2017, il y avait deux sites d'essais en Estrie, sur la même ferme à Val-Joli et sur la ferme du CDRS ainsi que deux sites en Beauce, sur une ferme à Sainte-Marie et une ferme à Saint-Anselme. Un protocole en bloc complet (les blocs étaient perpendiculaires à la pente la plus forte) a été mis en place avec 3 répétitions.

En 2016, les rendements obtenus se rapprochaient de l'optimum, toutefois, il était important d'avoir des doses plus importantes pour confirmer l'obtention d'un plateau. Aussi, les traitements ont été modifiés de la façon suivante :

**Tableau 3. Protocole de fertilisation dans les prairies en 2017**

	Printemps	Après 1ère coupe	Après 2ème coupe	Total
	Kg N/ha			
T1	0	0	0	<b>0</b>
T2	50	50	50	<b>150</b>
T3	75	50	50	<b>175</b>
T4	75	75	75	<b>225</b>
T5	100	50	50	<b>200</b>
T6	100	75	75	<b>250</b>
T7	125	50	50	<b>225</b>
T8	125	75	75	<b>275</b>
T9	150	50	50	<b>250</b>
T10	150	75	75	<b>300</b>
T11	175	75	75	<b>325</b>
T12	175	100	100	<b>375</b>

En Estrie, la superficie des parcelles étaient de 25 m<sup>2</sup> (5 m par 5 m). Pour les sites localisés dans la région de Chaudière-Appalaches, la taille des parcelles s'élevait à 7,5 m<sup>2</sup>. (1,5 m large X 5 m long). Le choix de la disposition des parcelles ont été faits en fonction du champ (superficie disponible, topographie et pédologie). Il n'y avait pas d'espace inter-parcelles.

Sur chaque site, le dispositif expérimental était délimité de manière à éviter l'application de fumier et d'engrais par le propriétaire (drapeaux, piquets de déneigement). Des tuyaux de PVC ont

été mis afin de pouvoir retrouver les parcelles suites aux fauches. Les parcelles ont aussi été géo-référencées avec GPS de précision (20 cm).



**Photo 1 : Identification des parcelles**

À chaque année, les prairies ont été fertilisées avec des engrais chimiques. Les besoins en phosphore et en potassium ont été comblés avec du super phosphate 0-46-0 et du muriate de potassium 0-0-60 appliqués au printemps seulement. Les doses étaient établies en fonction des recommandations du CRAAQ, donc selon l'analyse de sol et/ou le groupe textural. L'azote a été appliqué sous forme d'ammonitrate de calcium (27-0-0) à chaque année et selon les traitements (tableaux 1, 2 et 3). Les engrais ont été appliqués manuellement à la volée.

Les premières coupes ont été réalisées lorsque les graminées étaient au stade début épiaison (prise de quadras en Estrie et récolte mécanisée avec équipement de récolte pour petites parcelles en Chaudière-Appalaches). Les coupes subséquentes ont été réalisées environ de 5 à 6 semaines après la fauche précédente. Il y a eu trois coupes pour chaque site (sauf en 2017, sur le site de Val-Joli). En Estrie, il fallait attendre que le producteur fauche le foin avant d'appliquer les engrais alors qu'en Chaudière-Appalaches, une fourragère de parcelle de marque Carter a été utilisée pour nettoyer les parcelles immédiatement après la récolte.

En Estrie, la récolte de foin, pour chaque coupe, a été réalisée à la main avec une cisaille électrique avant que le producteur ne récolte. Le foin de deux quadras de 50 X 50 centimètres ont été récoltés, par parcelle. La hauteur de récolte était à 4-6 centimètres du sol. En Chaudière-Appalaches, la récolte a été réalisée avec une fourragère automotrice de parcelle de marque Carter ((Carter MFG Co., Brookston, IN). Sur une largeur de 0,90 cm, la hauteur de coupe a été ajustée à 5 cm.

Aussitôt récolté, le foin a été séché à 55 degrés Celsius jusqu'à ce que le poids de l'échantillon reste stable. Les échantillons des parcelles récoltées en Estrie ont été analysés en proche infra-rouge

(NIR) dans un laboratoire privé. Ceux récoltés en Beauce ont été analysés par le laboratoire d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Québec par digestion dans un mélange d'acide sulfurique et d'acide sélénieux (Isaac and Johnson, 1976). La détermination de la teneur en azote des tissus végétaux a été mesurée avec un colorimètre automatisé de marque Lachat (Lachat Instruments, Loveland, CO, Model QuickChem 8000 FIA+, disponible à <http://www.lachatinstruments.com/applications/methods.asp>). La procédure impliquant l'utilisation de salicylate nitroprusside (méthode 13-107-04-1-a) a été utilisée. La teneur en azote, combiné au rendement mesurés a permis de calculer l'indice de nutrition azoté.



**Photo 2. Première coupe, site Tremblay  
3 juin 2015**



**Photo 3. Première coupe, site Tremblay  
3 juin 2015**

## 1.2. Présentation des résultats<sup>1</sup>

Les doses d'engrais appliquées au printemps ont un impact sur le rendement de la première coupe, mais aussi sur les coupes subséquentes. Aussi, l'analyse statistique n'a pas été réalisée séparément pour chaque coupe, mais sur la somme des coupes (1 et 2 pour la coupe 2 et 1, 2 et 3 pour la troisième coupe).

---

<sup>1</sup> Les analyses en Estrie ont été réalisées en proche infra-rouge alors que celles des échantillons prélevés Beauce ont été réalisées chimiquement. En 2017, 180 échantillons ont été analysés à la fois en chimie (laboratoire d'AAC à Québec) et en proche infra-rouge (laboratoire privé). L'écart moyen de concentration en azote pour les prairies était de 3 mgNg-1MS (  $y$  (chimie) = 1.015 x (proche infrarouge) + 2.87,  $R^2 = 0,92$ ). Ce qui au final représentait un écart moyen du bilan azoté de + ou – 10 kg N/ha. Aussi, nous avons conservé les données analysées en proche-infra rouge (telle quelles sans les convertir (avec l'équation) sur une même base que celles mesurées en chimie) dans ce rapport.

## 1.2.1 Résultats en 2015

Tableau 4. Résultats du suivi des prairies de graminées, sur deux sites en Estrie en 2015.

**1<sup>ère</sup> coupe: Moyenne des deux sites : Champ 15 (Ferme TREMCO; Val-Joli) et champ C2-4 (CRDS, Sherbrooke) 2015**

Azote printemps (kg N/ha)	Azote 1 <sup>ère</sup> coupe (kg N/ha)	Azote 2 <sup>ème</sup> coupe (kg N/ha)	Azote Total (kg N/ha)	Apport N total - N exporté coupes précédentes (kg N/ha)	INA	Rendement (1 <sup>ère</sup> coupe uniquement) (T/ha)	Taux Protéine brute (%)	N-Export (par la coupe) (kg N/ha)	N-Export (toutes les coupes) (kg N/ha)	Bilan (toutes les coupes) (kg N/ha)
0			0	0	0,7	3,7	14,4	86	86	-86
0			0	0	0,7	3,5	14,1	80	80	-80
25			25	25	0,7	3,8	13,9	85	85	-60
50			50	50	0,8	4,2	15,3	102	102	-52
75			75	75	0,9	4,5	16,9	123	123	-48

**2<sup>ème</sup> coupe: Moyenne des deux sites : Champ 15 (Ferme TREMCO; Val-Joli) et champ C2-4 (CRDS, Sherbrooke) 2015**

Azote printemps (kg N/ha)	Azote 1 <sup>ère</sup> coupe (kg N/ha)	Azote 2 <sup>ème</sup> coupe (kg N/ha)	Azote Total (kg N/ha)	Apport N total - N exporté coupes précédentes (kg N/ha)	INA	Rendement (2 <sup>ème</sup> coupe uniquement) (T/ha)	Taux Protéine brute (%)	N-Export (par la coupe) (kg N/ha)	N-Export (toutes les coupes) (kg N/ha)	Bilan (toutes les coupes) (kg N/ha)
0	25		25	-61	0,6	2,1	13,3	45	131	-106
25	25		50	-35	0,5	2,2	11,3	40	124	-74
0	50		50	-30	0,5	2,6	11,7	49	129	-79
50	50		100	-2	0,5	2,5	11,4	46	149	-49
75	50		125	2	0,5	2,7	10,9	47	169	-44

**3<sup>ème</sup> coupe: Moyenne des deux sites : Champ 15 (Ferme TREMCO; Val-Joli) et champ C2-4 (CRDS, Sherbrooke) 2015**

Azote printemps (kg N/ha)	Azote 1 <sup>ère</sup> coupe (kg N/ha)	Azote 2 <sup>ème</sup> coupe (kg N/ha)	<b>Azote Total</b> <b>(kg N/ha)</b>	Apport N total - N exporté coupes précédentes (kg N/ha)	<b>INA</b>	Rendement (3 <sup>ème</sup> coupe uniquement) (T/ha)	Taux Protéine brute (%)	N-Export (par la coupe) (kg N/ha)	N-Export (toutes les coupes) (kg N/ha)	Bilan (toutes les coupes) (kg N/ha)
0	25	25	<b>50</b>	-81	<b>0,7</b>	1,9	17,0	51	182	-132
25	25	25	<b>75</b>	-49	<b>0,6</b>	2,1	15,1	50	174	-99
0	50	50	<b>100</b>	-29	<b>0,8</b>	2,2	17,8	63	191	-91
50	50	50	<b>150</b>	1	<b>0,7</b>	2,2	16,9	58	207	-57
75	50	50	<b>175</b>	6	<b>0,8</b>	2,2	17,8	61	231	-56

L'augmentation du rendement à la 1<sup>ère</sup> coupe (moyenne pour les deux sites) en fonction de l'apport d'azote a été linéaire (Figure 1). On a retrouvé la même linéarité pour les coupes 1 et 2 réunies ensemble (Figure 2) ainsi que pour les 3 coupes (Figure 3).

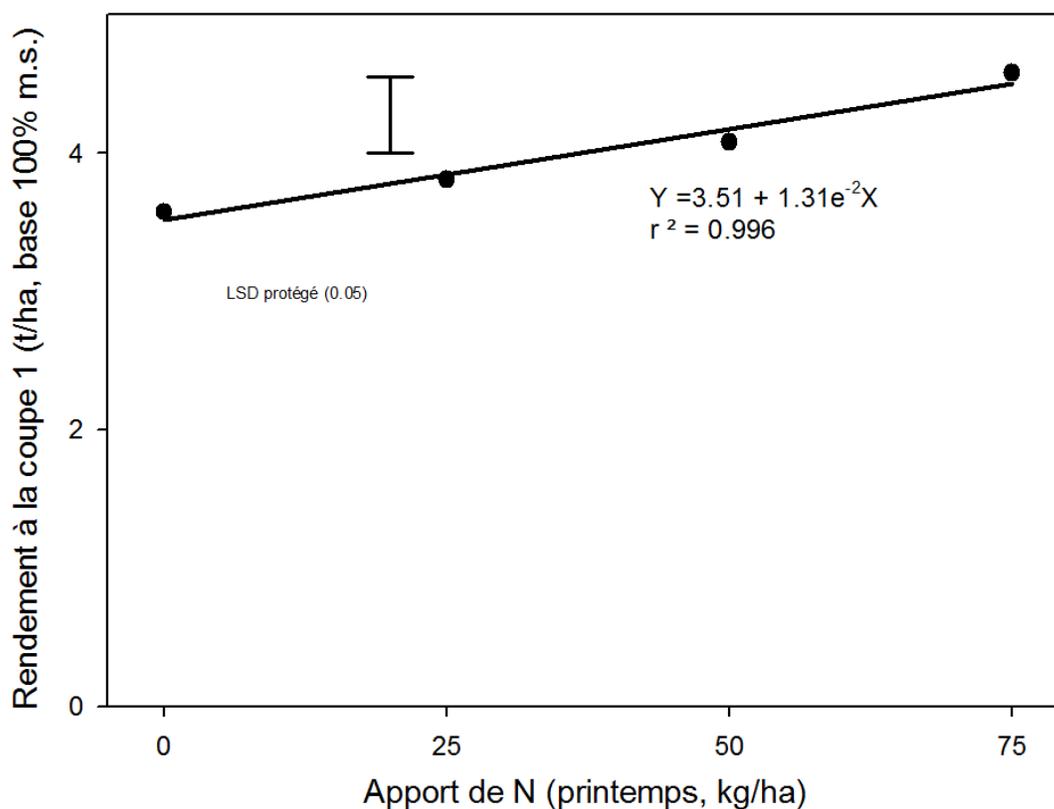


Figure 1. Rendement de la 1<sup>ère</sup> coupe selon l'azote apporté au printemps (moyenne des deux sites en Estrie) en 2015

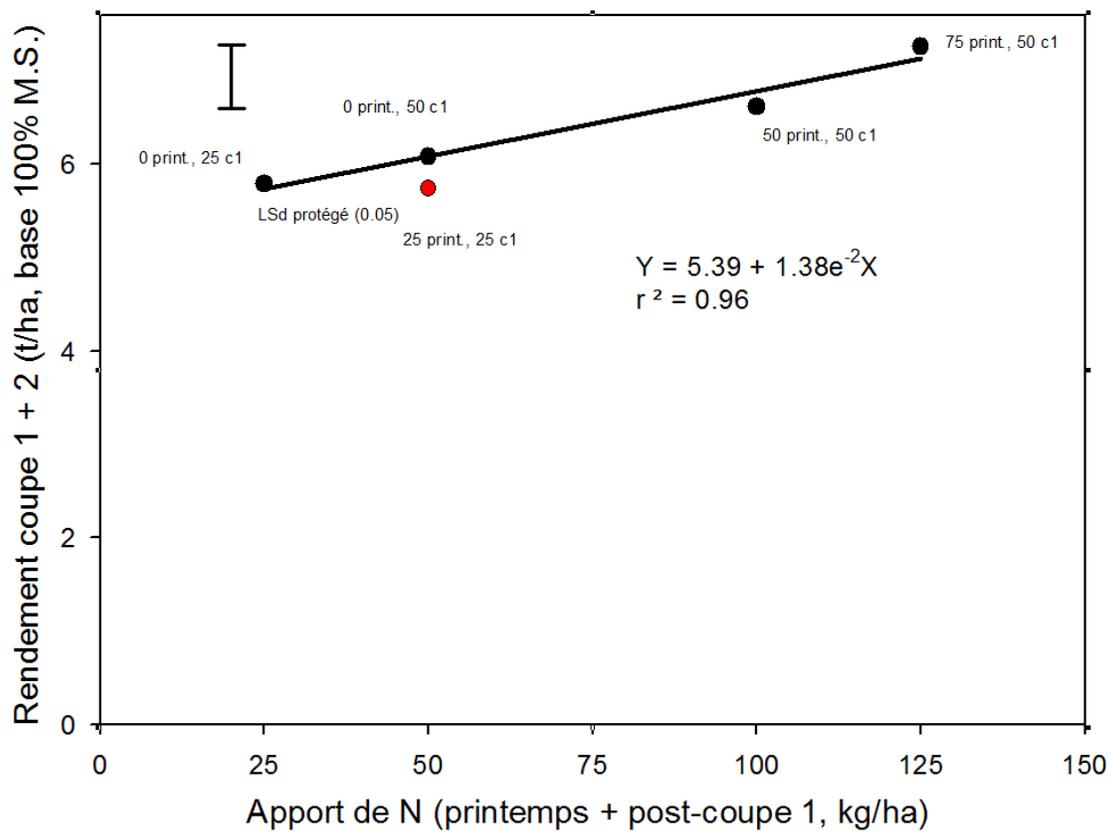
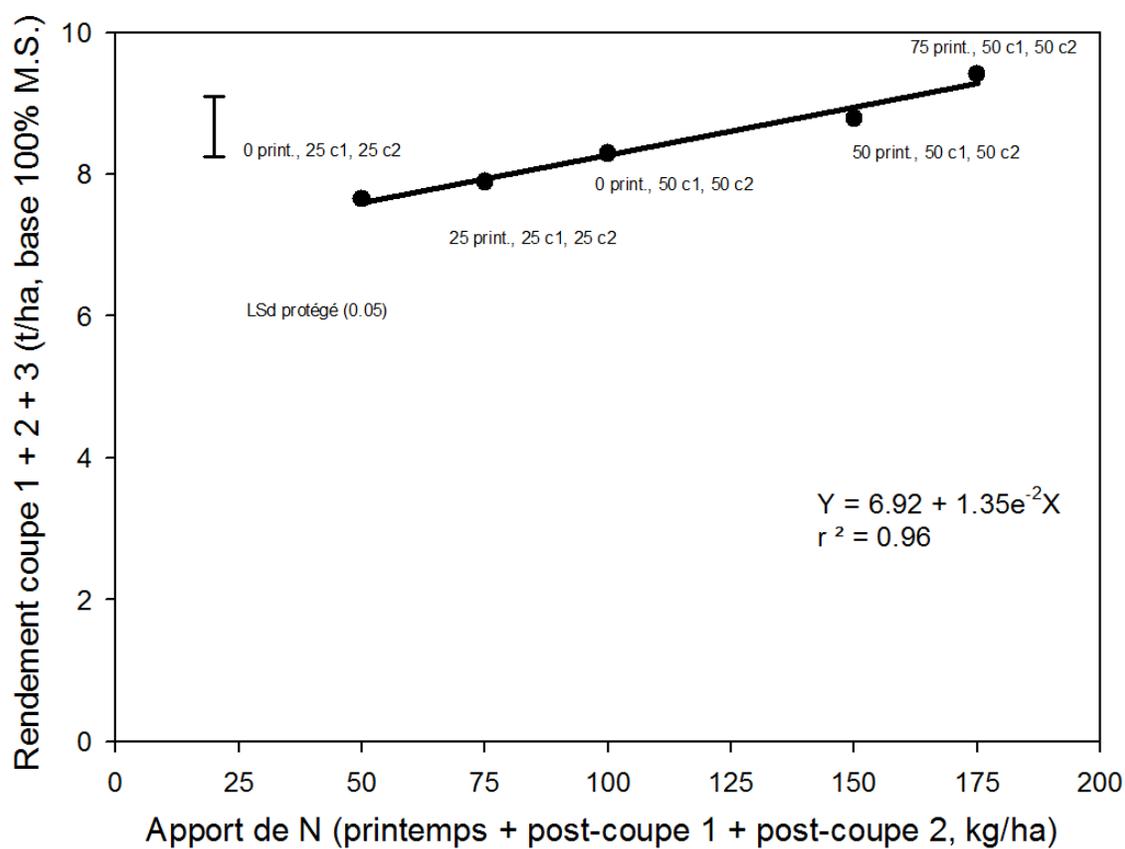


Figure 2. Rendement des coupes 1 et 2 selon l'azote apporté (au printemps et après la 1<sup>ère</sup> coupe) (moyenne des deux sites en Estrie) en 2015



**Figure 3. Rendement des 3 coupes selon l'azote apporté (au printemps et après la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> coupe) (moyenne des deux sites en Estrie) en 2015**

### 1.2.2 Résultats en 2016

Tableau 5. Résultats du suivi des prairies de graminées, sur quatre sites ( 2 en Estrie et 2 en Beauce) en 2016.

**1<sup>ère</sup> coupe: Moyenne des quatre sites (Val-Joli; Sherbrooke; Saint-Isidore; Saint-Narcisse) 2016**

Azote printemps (kg N/ha)	Azote 1 <sup>ère</sup> coupe (kg N/ha)	Azote 2 <sup>ème</sup> coupe (kg N/ha)	Azote Total (kg N/ha)	Apport N total - N exporté coupes précédentes (kg N/ha)	INA	Rendement (1 <sup>ère</sup> coupe uniquement) (T/ha)	Taux Protéine brute (%)	N-Export (par la coupe) (kg N/ha)	N-Export (toutes les coupes) (kg N/ha)	Bilan (toutes les coupes) (kg N/ha)
0			<b>0</b>	0	<b>0,6</b>	4,5	10,7	80	80	-80
25			<b>25</b>	25	<b>0,7</b>	5,0	12,0	98	98	-73
50			<b>50</b>	50	<b>0,7</b>	5,2	12,3	105	105	-55
50			<b>50</b>	50	<b>0,7</b>	4,9	12,6	101	101	-51
75			<b>75</b>	75	<b>0,8</b>	5,4	13,1	114	114	-39
75			<b>75</b>	75	<b>0,8</b>	5,6	13,3	120	120	-45
75			<b>75</b>	75	<b>0,7</b>	5,4	12,9	114	114	-39
100			<b>100</b>	100	<b>0,8</b>	5,6	14,2	130	130	-30
100			<b>100</b>	100	<b>0,8</b>	5,5	13,5	120	120	-20
100			<b>100</b>	100	<b>0,8</b>	5,4	13,5	118	118	-18
125			<b>125</b>	125	<b>0,8</b>	5,5	14,1	126	126	-1
125			<b>125</b>	125	<b>0,8</b>	5,9	14,2	134	134	-9
125			<b>125</b>	125	<b>0,8</b>	5,6	14,7	133	133	-8

**2<sup>ème</sup> coupe: Moyenne des quatre sites (Val-Joli; Sherbrooke; Saint-Isidore; Saint-Narcisse) 2016**

Azote printemps (kg N/ha)	Azote 1 <sup>ère</sup> coupe (kg N/ha)	Azote 2 <sup>ème</sup> coupe (kg N/ha)	Azote Total (kg N/ha)	Apport N total - N exporté coupes précédentes (kg N/ha)	INA	Rendement (2 <sup>ème</sup> coupe uniquement) (T/ha)	Taux Protéine brute (%)	N-Export (par la coupe) (kg N/ha)	N-Export (toutes les coupes) (kg N/ha)	Bilan (toutes les coupes) (kg N/ha)
0	0		<b>0</b>	-80	<b>0,5</b>	2,0	13,0	42	121	-121
25	25		<b>50</b>	-48	<b>0,6</b>	2,6	13,0	53	151	-101
50	25		<b>75</b>	-30	<b>0,6</b>	2,6	13,8	58	163	-88
50	50		<b>100</b>	-1	<b>0,7</b>	3,1	14,5	71	171	-71
75	25		<b>100</b>	-14	<b>0,6</b>	2,8	13,4	60	174	-74
75	50		<b>125</b>	5	<b>0,7</b>	3,5	14,7	82	202	-77
100	25		<b>125</b>	-5	<b>0,7</b>	3,2	14,1	72	202	-83
75	75		<b>150</b>	36	<b>0,7</b>	3,5	15,2	84	197	-47
100	50		<b>150</b>	30	<b>0,7</b>	3,4	14,9	80	200	-50
125	25		<b>150</b>	24	<b>0,7</b>	3,2	14,0	72	198	-48
100	75		<b>175</b>	57	<b>0,8</b>	3,4	15,8	86	204	-29
125	50		<b>175</b>	41	<b>0,8</b>	3,7	15,3	89	224	-49
125	75		<b>200</b>	67	<b>0,8</b>	3,6	16,1	91	225	-25

**3<sup>ème</sup> coupe: Moyenne des quatre sites (Val-Joli; Sherbrooke; Saint-Isidore; Saint-Narcisse) 2016**

Azote printemps (kg N/ha)	Azote 1 <sup>ère</sup> coupe (kg N/ha)	Azote 2 <sup>ème</sup> coupe (kg N/ha)	Azote Total (kg N/ha)	Apport N total - N exporté coupes précédentes (kg N/ha)	INA	Rendement (3 <sup>ème</sup> coupe uniquement) (T/ha)	Taux Protéine brute (%)	N-Export (par la coupe) (kg N/ha)	N-Export (toutes les coupes) (kg N/ha)	Bilan (toutes les coupes) (kg N/ha)
0	0	0	<b>0</b>	-121	<b>0,6</b>	1,7	15,9	43	164	-164
25	25	25	<b>75</b>	-76	<b>0,7</b>	2,1	15,6	51	201	-128
50	25	25	<b>100</b>	-63	<b>0,7</b>	2,0	16,3	52	215	-115
75	25	25	<b>125</b>	-49	<b>0,7</b>	2,1	16,2	53	227	-102
50	50	50	<b>150</b>	-21	<b>0,7</b>	2,3	17,0	61	233	-83
100	25	25	<b>150</b>	-52	<b>0,7</b>	2,2	15,9	55	258	-102
125	25	25	<b>175</b>	-23	<b>0,7</b>	2,1	15,6	53	251	-76
75	50	50	<b>175</b>	-27	<b>0,7</b>	2,4	16,6	62	264	-89
100	50	50	<b>200</b>	0	<b>0,7</b>	2,3	16,1	59	259	-59
125	50	50	<b>225</b>	1	<b>0,8</b>	2,3	17,2	64	288	-63
75	75	75	<b>225</b>	28	<b>0,8</b>	2,4	17,9	68	266	-41
100	75	75	<b>250</b>	46	<b>0,8</b>	2,5	18,5	73	278	-28
125	75	75	<b>275</b>	50	<b>0,8</b>	2,4	18,5	71	295	-20

Comme en 2015 l'augmentation du rendement à la 1<sup>ère</sup> coupe (moyenne pour les deux sites) en fonction de l'apport d'azote a été linéaire (Figure 4). Pour les coupes 1 et 2 réunies ensemble (Figure 5) ainsi que pour les 3 coupes (Figure 6) le modèle quadratique présentait une meilleure corrélation.

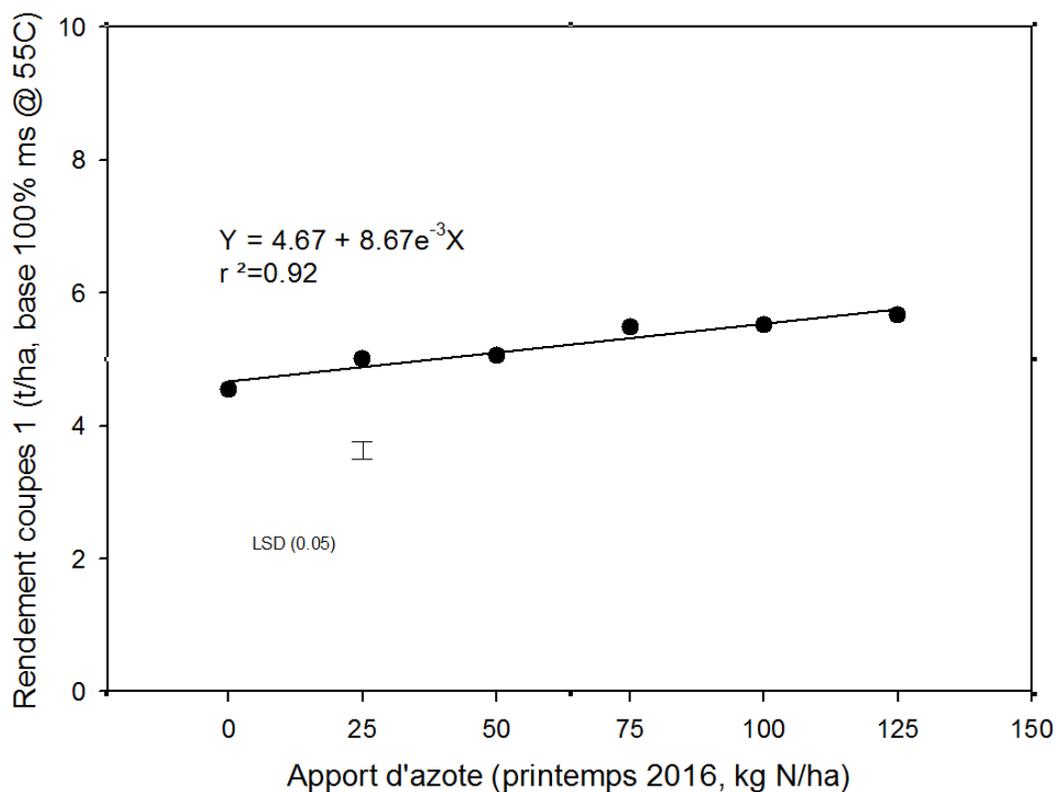
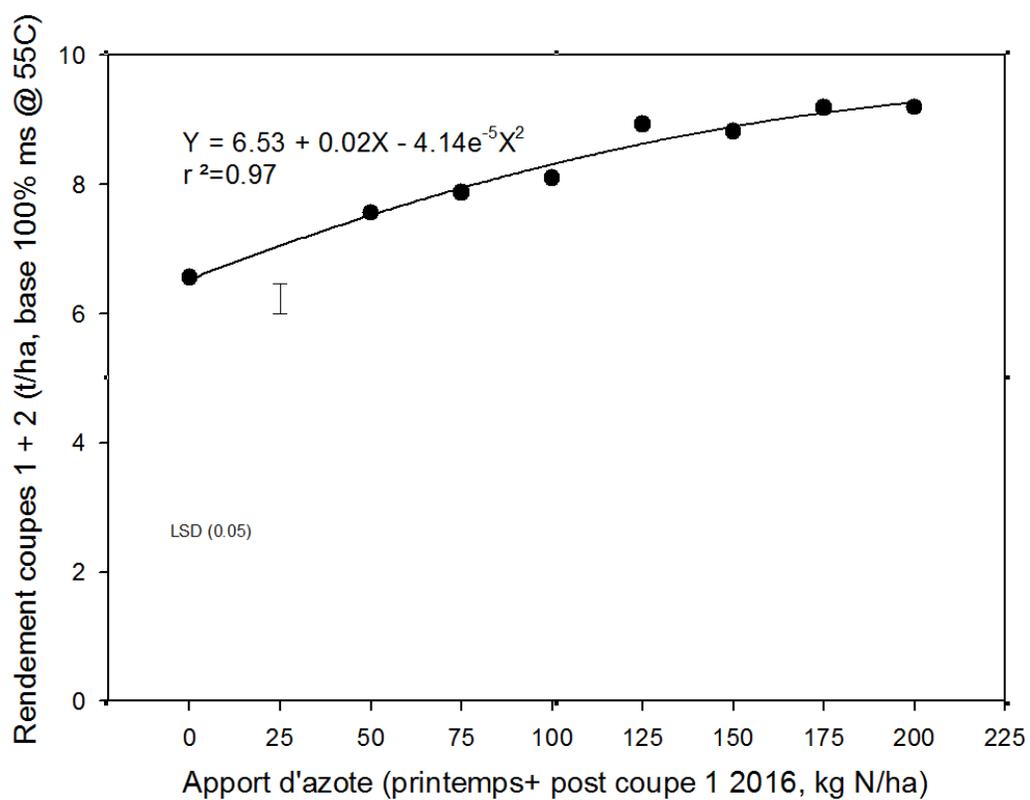


Figure 4. Rendement de la 1<sup>ère</sup> coupe selon l'azote apporté au printemps (moyenne des quatre sites) en 2016



**Figure 5. Rendement des coupes 1 et 2 selon l'azote apporté (au printemps et après la 1<sup>ère</sup> coupe) (moyenne des quatre sites) en 2016**

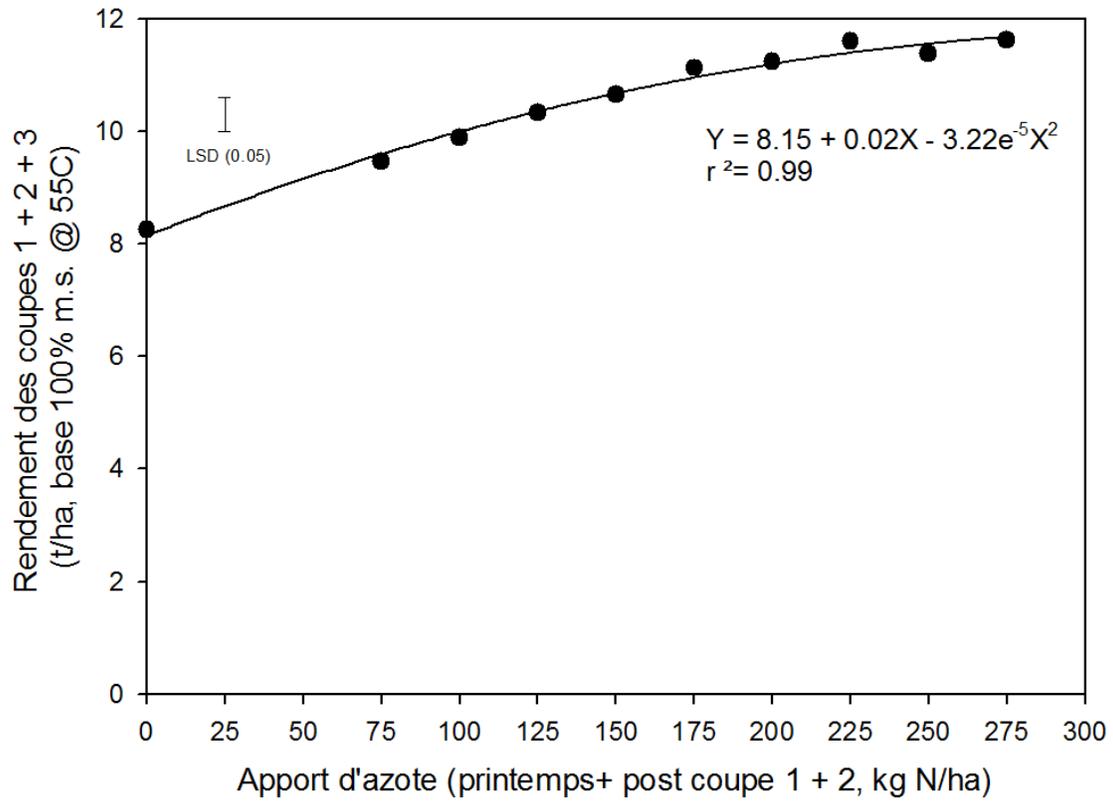


Figure 6. Rendement des 3 coupes selon l'azote apporté (au printemps et après la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> coupe) (moyenne des quatre sites) en 2016

### 1.2.3 Résultats en 2017

Tableau 6. Résultats du suivi des prairies de graminées, sur quatre sites ( 2 en Estrie et 2 en Beauce) en 2017

**1<sup>ère</sup> coupe: Moyenne des quatre sites (Val-Joli; Sherbrooke; Sainte-Marie; Saint-Anselme) 2017**

Azote printemps (kg N/ha)	Azote 1 <sup>ère</sup> coupe (kg N/ha)	Azote 2 <sup>ème</sup> Coupe (kg N/ha)	Azote Total (kg N/ha)	Apport N total - N exporté coupes précédentes (kg N/ha)	INA	Rendement (1 <sup>ère</sup> coupe uniquement) (T/ha)	Taux Protéine brute (%)	N-Export (par la coupe) (kg N/ha)	N-Export (toutes les coupes) (kg N/ha)	Bilan (toutes les coupes) (kg N/ha)
0			<b>0</b>	0	<b>0,7</b>	3,7	12,0	70	70	-70
50			<b>50</b>	50	<b>0,8</b>	4,8	13,3	98	98	-48
75			<b>75</b>	75	<b>0,9</b>	4,9	14,5	110	110	-35
75			<b>75</b>	75	<b>0,9</b>	4,7	14,3	108	108	-33
100			<b>100</b>	100	<b>0,9</b>	4,8	14,3	110	110	-10
100			<b>100</b>	100	<b>0,9</b>	4,9	14,6	113	113	-13
125			<b>125</b>	125	<b>0,9</b>	4,8	15,0	113	113	12
125			<b>125</b>	125	<b>1,0</b>	4,8	15,0	114	114	11
150			<b>150</b>	150	<b>1,0</b>	4,9	15,6	121	121	29
150			<b>150</b>	150	<b>1,0</b>	4,9	16,3	126	126	24
175			<b>175</b>	175	<b>1,0</b>	4,8	16,0	123	123	52
175			<b>175</b>	175	<b>1,1</b>	4,9	16,8	130	130	45

**2<sup>ème</sup> coupe: Moyenne des quatre sites (Val-Joli; Sherbrooke; Sainte-Marie; Saint-Anselme) 2017**

Azote printemps (kg N/ha)	Azote 1 <sup>ère</sup> coupe (kg N/ha)	Azote 2 <sup>ème</sup> Coupe (kg N/ha)	Azote Total (kg N/ha)	Apport N total - N exporté coupes précédentes (kg N/ha)	INA	Rendement (2 <sup>ème</sup> coupe uniquement) (T/ha)	Taux Protéine brute (%)	N-Export (par la coupe) (kg N/ha)	N-Export (toutes les coupes) (kg N/ha)	Bilan (toutes les coupes) (kg N/ha)
0	0		<b>0</b>	-70	<b>0,6</b>	2,0	14,0	47	117	-117
50	50		<b>100</b>	2	<b>0,8</b>	3,0	15,0	72	170	-70
75	50		<b>125</b>	15	<b>0,8</b>	3,2	15,4	78	188	-63
75	75		<b>150</b>	42	<b>0,8</b>	3,2	15,5	79	188	-38
100	50		<b>150</b>	40	<b>0,8</b>	3,1	15,6	77	187	-37
100	75		<b>175</b>	62	<b>0,9</b>	3,2	15,9	81	194	-19
125	50		<b>175</b>	62	<b>0,9</b>	3,3	16,1	84	197	-22
125	75		<b>200</b>	86	<b>0,9</b>	3,4	16,0	87	201	-1
150	50		<b>200</b>	79	<b>0,9</b>	3,0	16,7	80	201	-1
150	75		<b>225</b>	99	<b>0,9</b>	3,3	16,8	87	212	13
175	75		<b>250</b>	127	<b>0,9</b>	3,4	16,4	91	214	38
175	100		<b>275</b>	145	<b>1,0</b>	3,4	17,5	94	224	51

**3<sup>ème</sup> coupe: Moyenne des trois sites (Sherbrooke; Sainte-Marie; Saint-Anselme) 2017**

Azote printemps (kg N/ha)	Azote 1 <sup>ère</sup> coupe (kg N/ha)	Azote 2 <sup>ème</sup> coupe (kg N/ha)	Azote Total (kg N/ha)	Apport N total - N exporté coupes précédentes (kg N/ha)	INA	Rendement (3 <sup>ème</sup> coupe uniquement) (T/ha)	Taux Protéine brute (%)	N-Export (par la coupe) (kg N/ha)	N-Export (toutes les coupes) (kg N/ha)	Bilan (toutes les coupes) (kg N/ha)
0	0	0	<b>0</b>	-134	<b>0,7</b>	1,8	17,5	49	182	-182
50	50	50	<b>150</b>	-33	<b>0,8</b>	2,4	18,1	64	247	-97
75	50	50	<b>175</b>	-32	<b>0,9</b>	2,5	19,0	73	279	-104
100	50	50	<b>200</b>	-10	<b>0,8</b>	2,5	18,0	69	279	-79
75	75	75	<b>225</b>	15	<b>0,9</b>	2,7	19,6	81	291	-66
125	50	50	<b>225</b>	8	<b>0,9</b>	2,4	18,7	70	287	-62
100	75	75	<b>250</b>	39	<b>0,9</b>	2,7	19,0	77	288	-38
150	50	50	<b>250</b>	33	<b>0,9</b>	2,5	19,2	74	291	-41
125	75	75	<b>275</b>	56	<b>0,9</b>	2,7	18,3	70	288	-13
150	75	75	<b>300</b>	74	<b>0,9</b>	2,7	19,1	77	303	-3
175	75	75	<b>325</b>	96	<b>1,0</b>	2,7	20,2	81	309	25
175	100	100	<b>375</b>	128	<b>1,0</b>	2,7	20,8	83	329	46

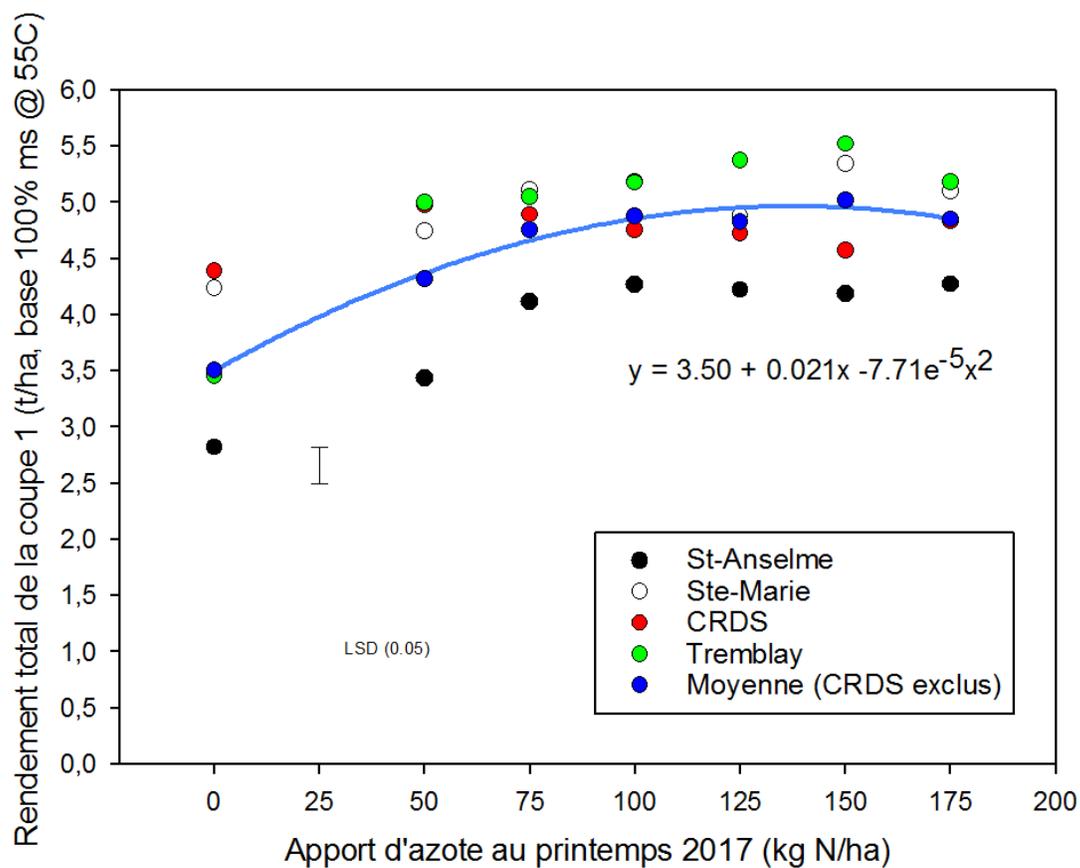


Figure 7. Rendement de la 1<sup>ère</sup> coupe selon l'azote apporté au printemps en 2017

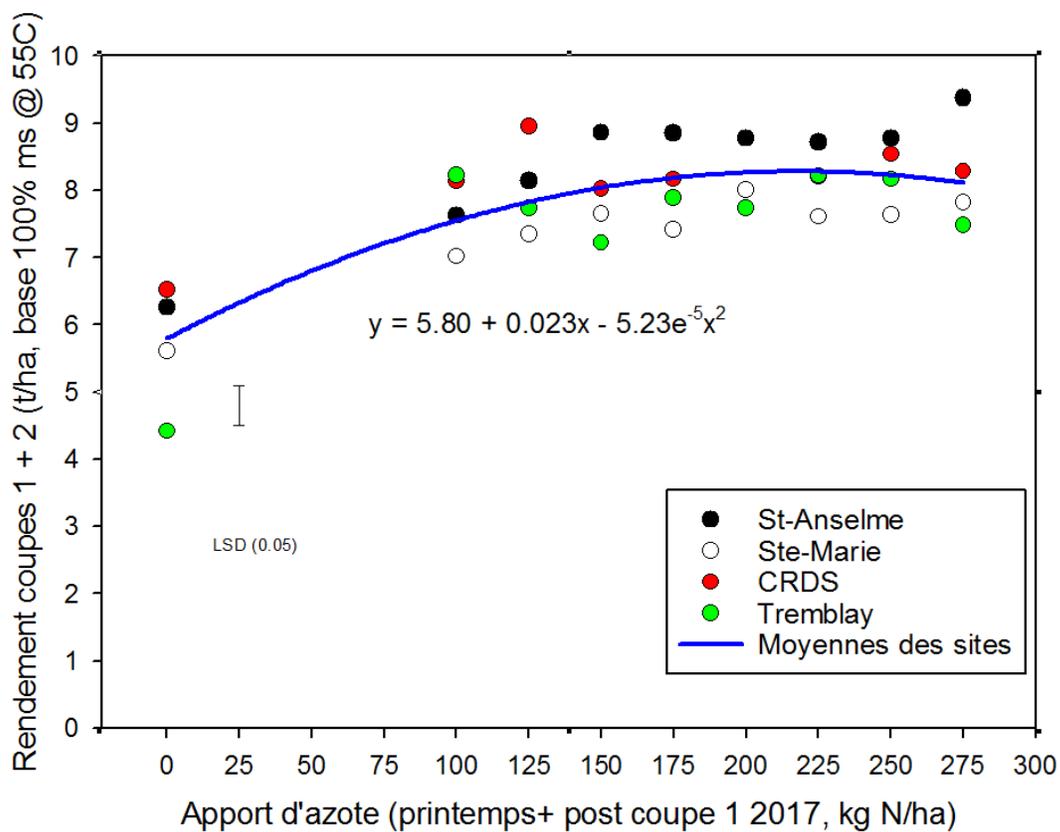
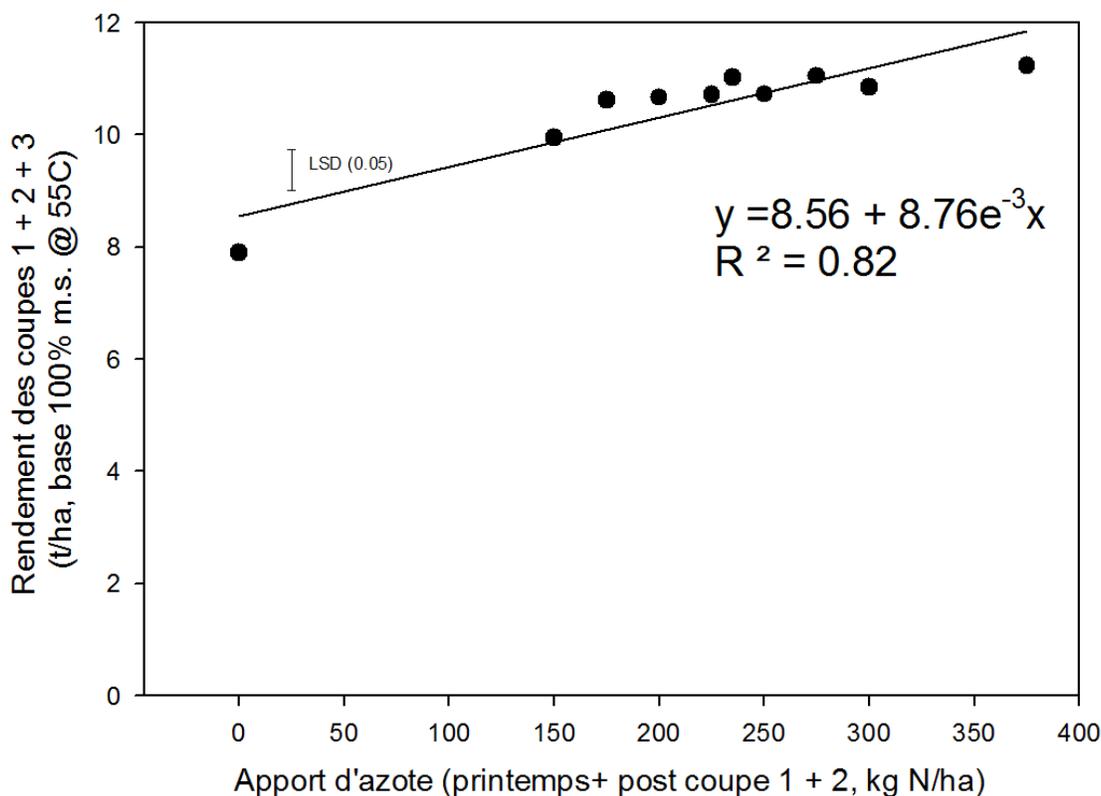


Figure 8. Rendement des coupes 1 et 2 selon l'azote apporté (au printemps et après la 1<sup>ère</sup> coupe) en 2017



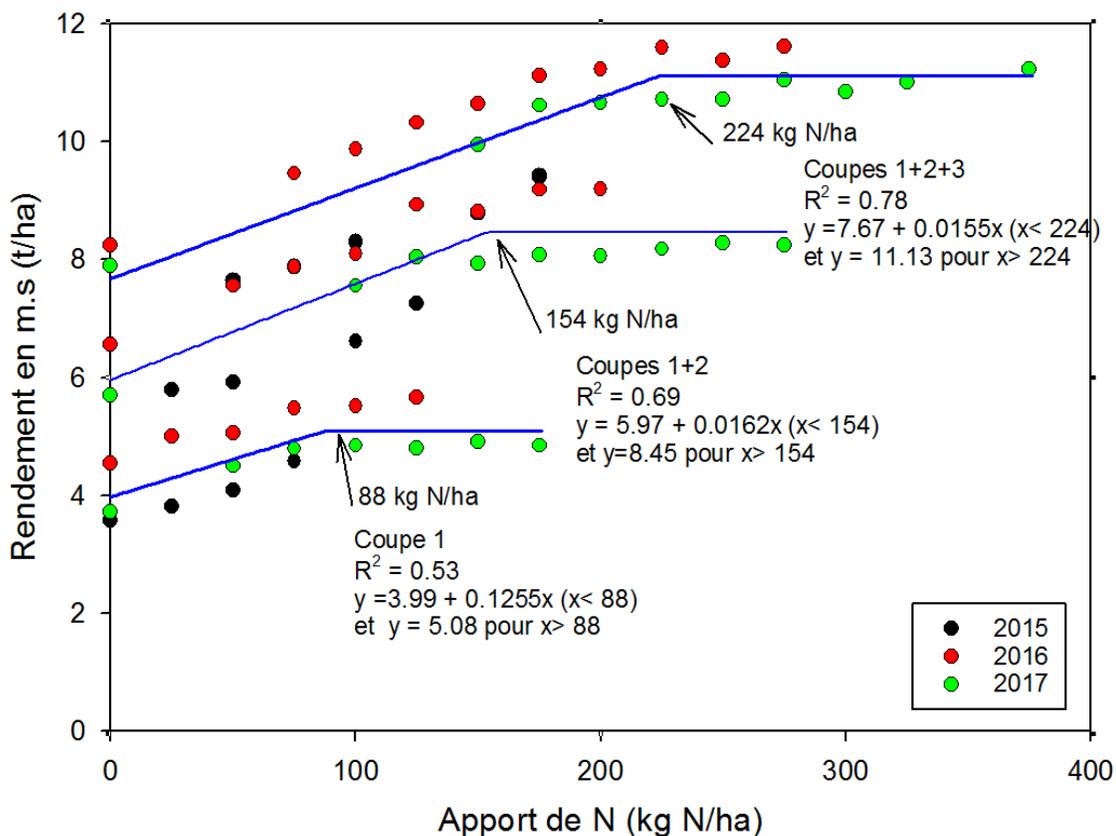
**Figure 9. Rendement des 3 coupes selon l'azote apporté (au printemps et après la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> coupe) (moyenne de trois sites, pas de 3<sup>ème</sup> coupe à Val-Joli) en 2017**

## 1.3. Analyse des résultats

### 1.3.1 Analyse des rendements

Durant les trois années de l'essai, le niveau de rendement en foin sans aucune fertilisation azotée a été relativement important si on le compare à ceux de la Financière Agricole du Québec (FADQ). Les essais ont été réalisés sur des fermes en production, dans des prairies ayant en général plus de 3 ans. Les sites ne présentaient aucune contrainte spéciale (pas d'accumulation d'eau, bon niveau de matière organique, etc.). La taille des parcelles, relativement restreinte, a limité grandement la variabilité spatiale. Enfin, le mode de récolte manuelle n'entraînait quasiment aucune perte aux champs. Ces sites ont aussi un historique de fertilisation avec des fumiers. Ainsi, nous avons pu constater que lorsque les prairies se trouvent sur des sols en bonne condition, ceux-ci ont la capacité de fournir un apport non négligeable en azote. Les prairies avaient un très faible pourcentage de légumineuses (inférieur à 20 %).

Ceci-dit, toutes les années, l'apport d'engrais azoté a conduit à une augmentation linéaire des rendements (note : pour les trois années combinées, les modèles linéaires étaient significativement meilleurs que les modèles quadratiques). Lorsqu'on regroupe les données de toutes les années ensemble, on constate que le rendement a commencé à atteindre un plateau avec les niveaux d'azotes suivant : 88 à 100 kg N/ha pour la première coupe, 154 à 160 kg N/ha pour deux coupes et 225 à 250 kg N/ha pour 3 coupes.



**Figure 10. Rendement en matière sèche obtenus selon l'azote apporté (au printemps et après la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> coupe) pour une régie à une coupe, deux coupes ou trois coupes durant les 3 années du projet.**

La recommandation maximale actuelle en fertilisation au Québec (CRAAQ 2010), pour des prairies ayant moins de 40 % de légumineuses, est de 160 kg N/ha (quel que soit le rendement obtenu entre 5 T et 10 T M.S./ha)<sup>2</sup>. Pour un régime à deux coupes, la recommandation est de 96 kg N/ha au printemps et de 64 kg N/ha après la 1<sup>ère</sup> coupe, ce qui correspond approximativement aux doses d'azote ayant donné les rendements optimaux dans cette étude. Par contre, dans une régie à trois

<sup>2</sup> Note : Le prix du foin et de l'azote sont utilisés comme barèmes pour déterminer la pertinence économique d'appliquer ou non ce niveau d'azote (notamment pour un rendement de 5TM.S./ha)

coupes, les recommandations actuelles sont de 60 kg N/ha au printemps et de 50 kg N/ha après chaque coupe. Selon les résultats de notre étude, la dose d'azote au printemps pourrait être augmentée à environ 100 kg N/ha comme dans un régime à deux coupes. Cette recommandation devrait toutefois être appuyée par un suivi des rendements réels obtenus sur la ferme, de manière à s'assurer que l'azote apporté a bien été utilisé et récolté. En effet, il est difficile de d'affirmer que les rendements pouvant être obtenus à la ferme sont semblables à ceux obtenus en parcelle (11 T/ha). Les champs présentent une variabilité spatiale et des conditions par toujours parfaites (drainage, chaulage, cap rocheux, etc.). On peut toutefois sans difficulté indiquer que dans nos essais (Figure 10), à chaque augmentation de 20 kg d'azote par ha, le rendement des trois coupes a augmenté de 300 kg de M.S. par ha, ceci jusqu'à l'atteinte du plateau à 225 kg N/ha. Pour la première coupe seulement, cette augmentation était de 256 kg M.S. /ha pour chaque 20 kg N/ha ajouté jusqu'à 88 kg N/ha.

Peu d'études au Québec ont porté sur des niveaux d'azote aussi importants. Une étude réalisée sous les conditions de la ville de Lévis a permis d'observer l'absence d'optimum agronomique (réponse non linéaire des rendements, suite à une fertilisation azoté où atteinte d'un plateau) et économique avec des doses d'azote maximale de 200 kg N/ha avec une régie à deux coupes (Gagnon *et al.*, 2017).

Selon une étude réalisée en Pennsylvanie, USA (Hall *et coll.*, 2003), les besoins en azote diffèrent selon la graminée (mil, fétuque, dactyle) et la régie de coupe. La dose optimale économique de la fétuque pour une régie trois coupes serait plus élevée que celle du mil ou du dactyle. Des doses économiques de 284, 368, et 299 kg N/ha ont été obtenues pour le dactyle, fétuque élevée, fléole des prés respectivement. Pour le brome, le plateau n'a pas été atteint à 402 kg N/ha.

Dans notre étude, nous n'avons pas caractérisé systématiquement les graminées présentes dans les parcelles expérimentales. En général, il s'agissait de mélanges de graminées (fléole des prés, brome, etc.) avec souvent des mauvaises herbes comme le pissenlit ou le chiendent. Ce qui correspond bien à la réalité des fermes qui conservent des prairies de plusieurs années. Après quelques années, la population de légumineuses diminue et le couvert végétal n'est pas uniforme.



**Photo 4. Ferme Tremco (Val-Joli)**  
9 juin 2016



**Photo 5. Ferme du CRDS (Sherbrooke)**  
6 juin 2016

### **1.3.2 Analyse du contenu en protéine brute et exportation d'azote par la récolte**

#### 1.3.2.1 Contenu en protéine brute

De façon générale, le taux de protéine brute (azote totale mesuré converti en protéine) du foin récolté augmente avec l'augmentation des apports d'azote (sauf en 2015 lors de la 2<sup>ème</sup> coupe), (Figure 13 à Figure 15). En moyenne pour la 1<sup>ère</sup> coupe des trois années, chaque apport de 50 kg N/ha a augmenté la teneur en protéine brute d'environ 1 %. Cette augmentation de la teneur en protéine brute pourrait permettre aux producteurs agricoles de limiter les apports d'intrants protéiques tels que le tourteau de soya. C'est un avantage économique supplémentaire.

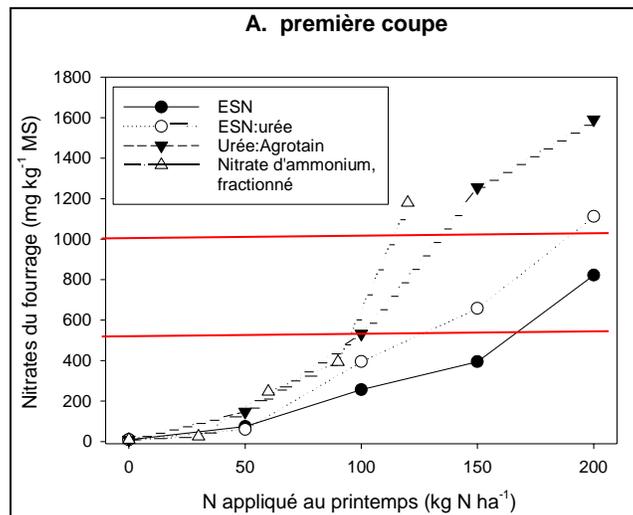
Selon le guide sur l'interprétation des analyses d'ensilage (Valacta, 2017), pour de l'ensilage de graminées, il faut viser une teneur en protéine brute de 13-17 %. Lorsque le taux de protéine brute des graminées vivaces ensilée dépasse 17 %, il y a des risques que la concentration en nitrates, soient trop élevée et le foin potentiellement toxique pour les animaux, il est donc recommandé de réduire la fertilisation azotée.

Le guide des plantes fourragères (CRAAQ, 2005) souligne les risques d'accumulation des nitrates et indique qu'un fourrage contenant plus de 0,75 % (750 ppm) de nitrates (ou 0,17% de N-NO<sub>3</sub>)<sup>3</sup> « est considéré comme potentiellement nuisible pour le ruminant ».

En ce qui concerne l'alimentation des chevaux, Mme Woodbury Kuvik, consultante en nutrition équine, suggère sur son site internet (<http://www.desertequinebalance.com/articles/high-protein-indicator-of-high-nitrate>) que si le taux de protéines brutes du foin qu'on veut fournir à des chevaux dépasse les moyennes fournies par deux bases de données américaines (<http://equi-analytical.com/interactive-common-feed-profile/> et <http://dairyone.com/analytical-services/feed-and-forage/feed-composition-library/interactive-feed-composition-library/>), soit environ 15,6 % sur une base de M.S., il faut faire un test pour vérifier les taux de nitrates. Si la concentration en nitrates est en bas 500 ppm (0,5%), le foin est correct. Entre 500 et 1 000 ppm (0,5 à 1%), ça devient risqué de l'utiliser, au-delà de 1 000 ppm (1%), le foin est considéré comme dangereux. Au-delà de 500 ppm, il est recommandé de diluer le foin avec d'autres foins ou d'autres aliments moins riches en nitrates.

À la 1<sup>ère</sup> coupe, le niveau de protéine brute est demeuré inférieur à 17 % avec un ajout azote suffisant pour obtenir le rendement optimum (autour de 100 kg N/ha). Toutefois, en 2015, ce taux de 17 % aurait sans doute pu être dépassé, car il était déjà atteint avec une application de 75 kg N/ha.

Selon les travaux de Bernard Gagnon (Gagnon et coll. 2017), les concentrations en nitrates ont commencé à dépasser 500 ppm avec des apports en azote au-delà de 100 kg N/ha sauf lors de l'utilisation de nitrate d'ammonium, pour lequel le niveau de nitrates a atteint 1 000 ppm avec 100 kg N/ha (Figure 11).

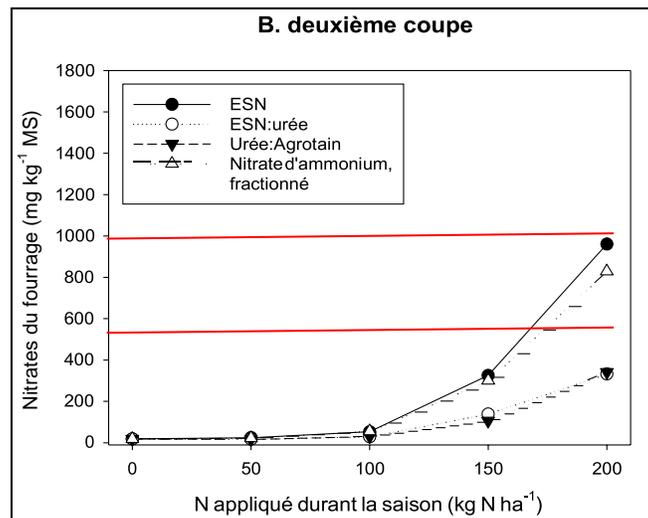


**Figure 11. Concentration en nitrates du foin de graminées à la 1<sup>ère</sup> coupe selon les apports de fertilisants azotés (Source : Gagnon et coll. 2017).**

<sup>3</sup> Nitrates = N-NO<sub>3</sub> x 4,4

Pour la deuxième coupe le niveau de 17 % de protéine brute était atteint avec des apports totaux de 200 kg N/ha, ce qui est plus élevé que le 160 kg N/ha permettant d'obtenir le rendement optimum.

Selon les travaux de Bernard Gagnon (Gagnon et coll. 2017), les concentrations en nitrates ont commencé à dépasser 500 ppm avec des apports de l'ordre de 160 kg N/ha, pour de l'azote apporté sous forme d'ESN (engrais enrobé) ou de nitrate d'ammonium. Lorsque l'azote était apporté sous forme d'urée avec inhibiteur d'uréase (Agrotain) ou en mélange ESN-Urée, les niveaux de nitrates sont demeurés en dessous de 500 ppm même avec des apports allant jusqu'à 200 kg N/ha (Figure 12).

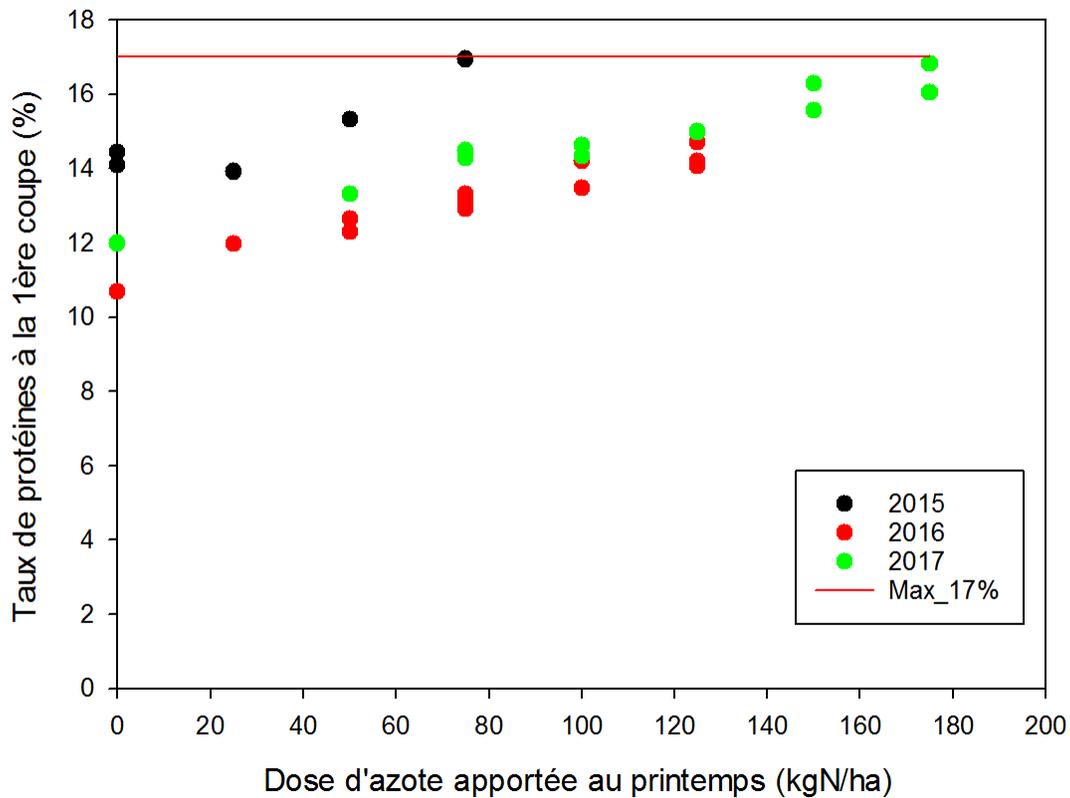


**Figure 12. Concentration en nitrates du foin de graminées à la 2<sup>ème</sup> coupe selon les apports de fertilisants azotés (Source : Gagnon et coll. 2017).**

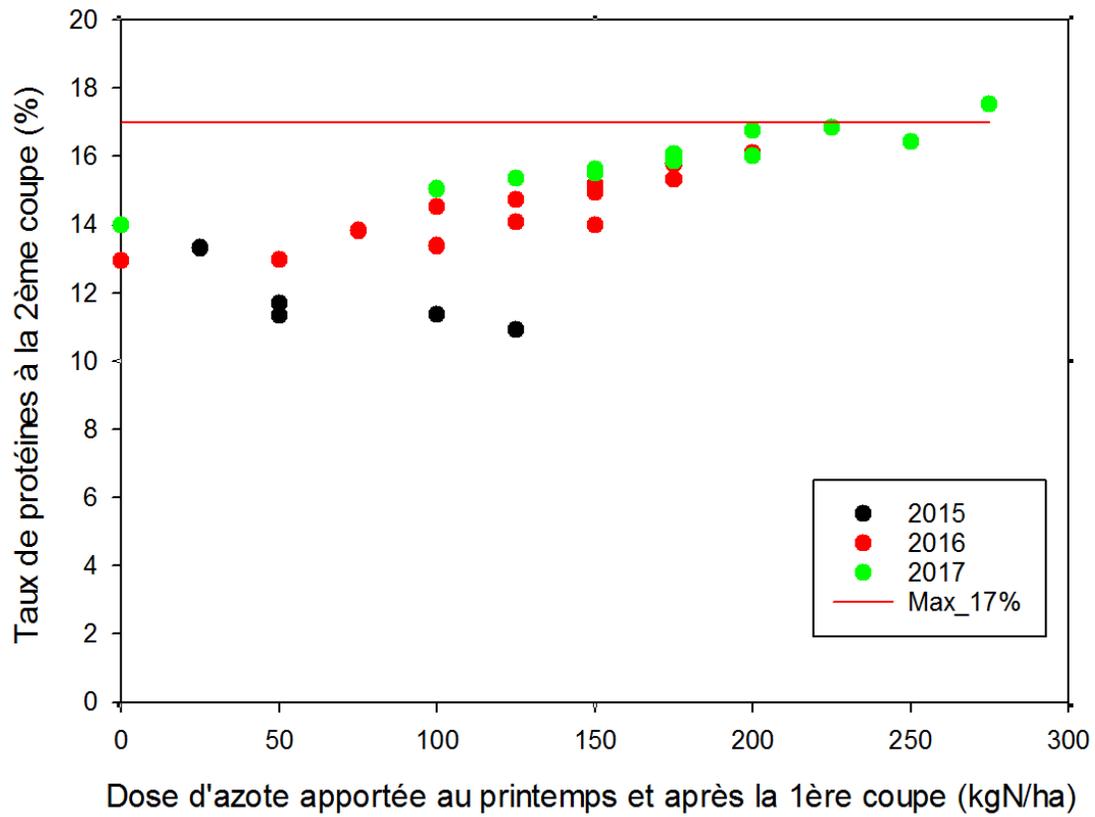
Pour la troisième coupe, le niveau de 17 % de protéine brute était atteint beaucoup plus rapidement. En 2017, il a même été atteint sans aucun apport d'azote. Mais de façon générale, lorsque la fertilisation dépassait 200 kg N/ha pour l'ensemble des trois coupes, le taux de protéine brute moyen de la 3<sup>ème</sup> coupe était supérieur à 17 %. L'étude de Gagnon et coll. 2017, n'ayant pas porté sur la 3<sup>ème</sup> coupe, nous ne pouvons établir de lien clair entre les niveaux de nitrates potentiellement présent et la fertilisation.

Aussi, il est important de noter que l'accumulation des nitrates dans les plantes varie aussi selon d'autres facteurs tels que : Le stade de développement : (plus de nitrates dans des plants plus jeunes); les parties de la plante : plus de dans les parties basses des tiges et des feuilles; les conditions de croissance, plus de nitrates dans des conditions adverses; la méthode de conservation : la fermentation peut réduire la concentration des nitrates de plus de 50% ( CRAAQ, 2005).

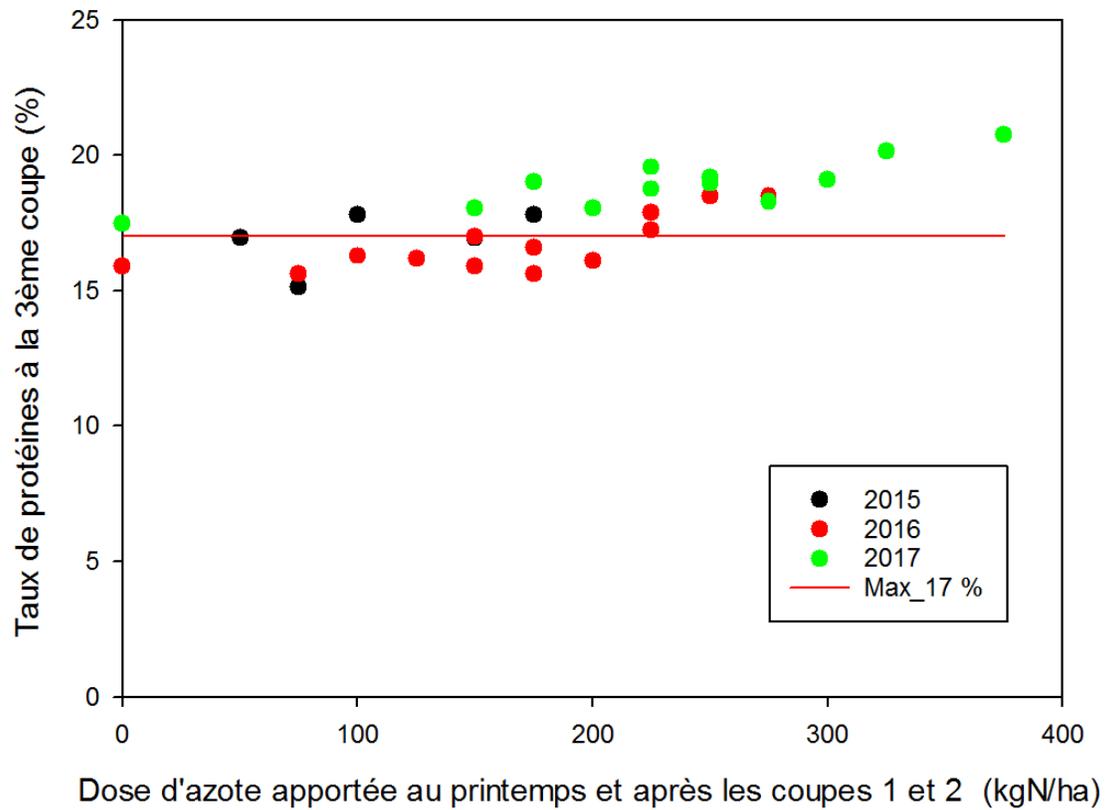
De manière prudente, l'augmentation des apports d'azote pour obtenir de meilleurs rendements, commande de surveiller les taux de protéine brute dans les fourrages, particulièrement à la troisième coupe, pour s'assurer de ne pas dépasser les niveaux moyens de protéine brute des analyses des graminées. Si ces niveaux moyens sont dépassés, il convient de vérifier les concentrations en nitrates des fourrages prêts à servir avant de les donner à manger aux animaux.



**Figure 13. Contenu moyen en protéine brute (tous les sites) de la 1<sup>ère</sup> coupe selon l'azote apporté au printemps durant les 3 années du projet.**



**Figure 14. Contenu moyen en protéine brute (tous les sites) de la 2<sup>ème</sup> coupe selon l'azote apporté au printemps et après la 1<sup>ère</sup> coupe durant les 3 années du projet.**



**Figure 15. Contenu moyen en protéine brute (tous les sites) de la 3<sup>ème</sup> coupe selon l'azote apporté au printemps et après la 1<sup>ère</sup> coupe durant les 3 années du projet.**

### 1.3.2.3 Prélèvement d'azote par la récolte

L'azote exporté (prélevé lors de la récolte de foin et sorti du champ) est important. Pour la 1<sup>ère</sup> coupe, il correspond à 80 kg N/ha (sans aucun apport d'azote) à environ 120 kg N/ha (avec un apport de 175 kg N/ha) (Figure 16). Dans un système à deux coupes, l'exportation totale correspond à environ 120 kg N/ha (sans aucun apport d'azote) à environ 220 kg N/ha (avec un apport de 275 kg N/ha) (Figure 17). Dans un système à trois coupes, l'exportation totale correspond à 160 -180 kg N/ha (sans aucun apport d'azote) à environ 330 kg N/ha (avec un apport de 375 kg N/ha) (Figure 18).

Hormis à la coupe 1, l'exportation d'azote ne semble pas atteindre de plateau, ainsi, plus on apporte d'azote, plus les graminées en absorbent.

En Ontario, la nouvelle recommandation de fertilisation des prairies de graminées fourragères a été basée sur le prélèvement de la culture (OMAFRA, 2017). Dans les prairies contenant moins de 30 % de légumineuses, il est recommandé d'apporter 23 kg N/ha par tonne de matière sèche prévue (rendement prévu) afin de remplacer le prélèvement par la culture. Dans nos essais, nous avons constaté que le prélèvement d'azote par tonne de matière sèche variait selon la fertilisation azotée appliquée. Ainsi, lors de la 1<sup>ère</sup> coupe, le prélèvement a varié de 17 à 26 kg N/T M.S. (Figure 16). Lors de la 2<sup>ème</sup> coupe le prélèvement a varié de 20 à 28 kg N/T M.S. (Figure 17) et lors de la 3<sup>ème</sup> coupe le prélèvement a varié de 25 à 34 kg N/T M.S. (Figure 18).

Cette recommandation d'azote, liée au rendement estimé, et à un prélèvement moyen, semble être un bon indice de calcul de la dose de N à appliquer. Ainsi, à la 1<sup>ère</sup> coupe, si le rendement escompté est de 5 T M.S./ha, les apports d'azote recommandés seraient de 115 kg N/ha, à la 2<sup>ème</sup> coupe, pour un rendement escompté de 2,5 T M.S./ha, les apports d'azote recommandés seraient de 57 kg N/ha et à la troisième coupe pour un rendement escompté de 2 T M.S./ha, les apports d'azote recommandés seraient de 46 kg N/ha. Tel que mentionné précédemment, il sera donc important de bien estimer les rendements escomptés pour éviter de sur-fertiliser les prairies.

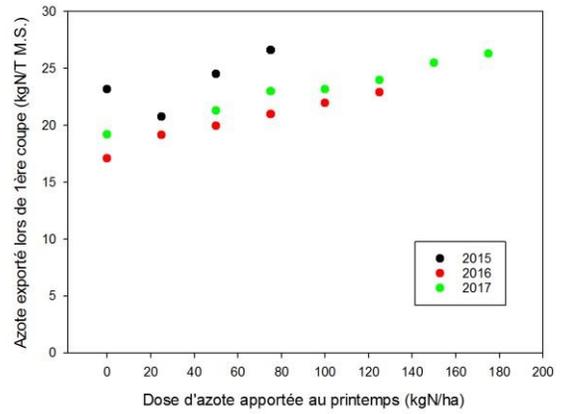
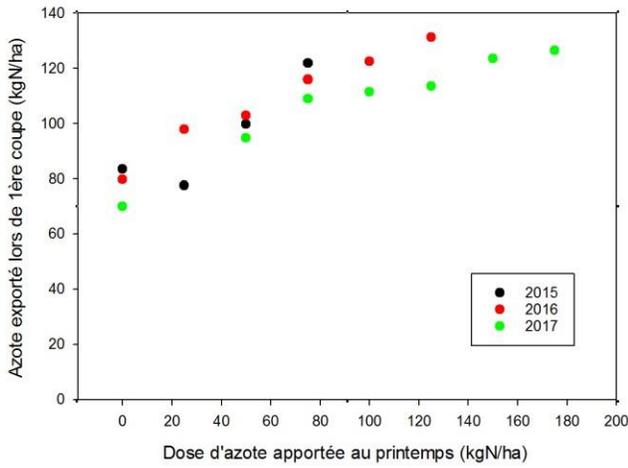


Figure 16. Prélèvement d'azote par la récolte (1<sup>ère</sup> coupe) selon l'azote apporté au printemps

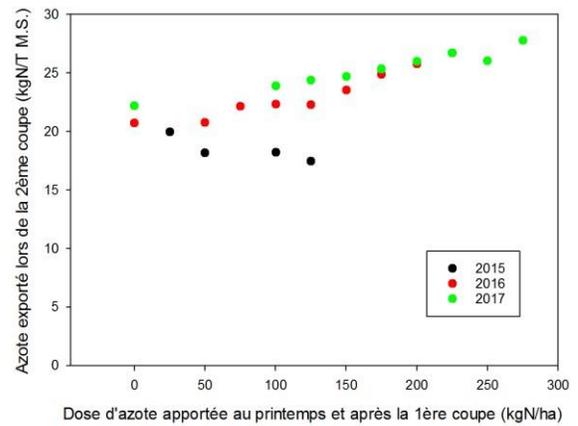
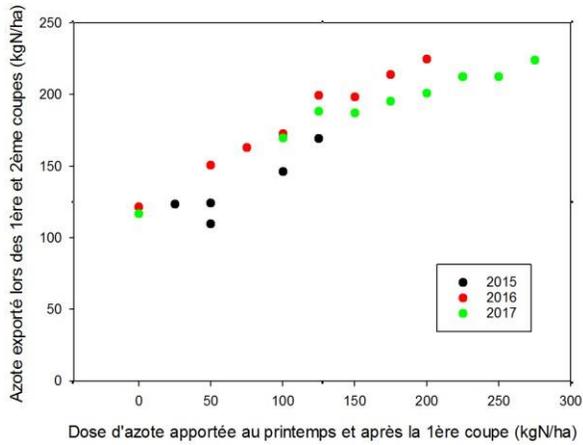
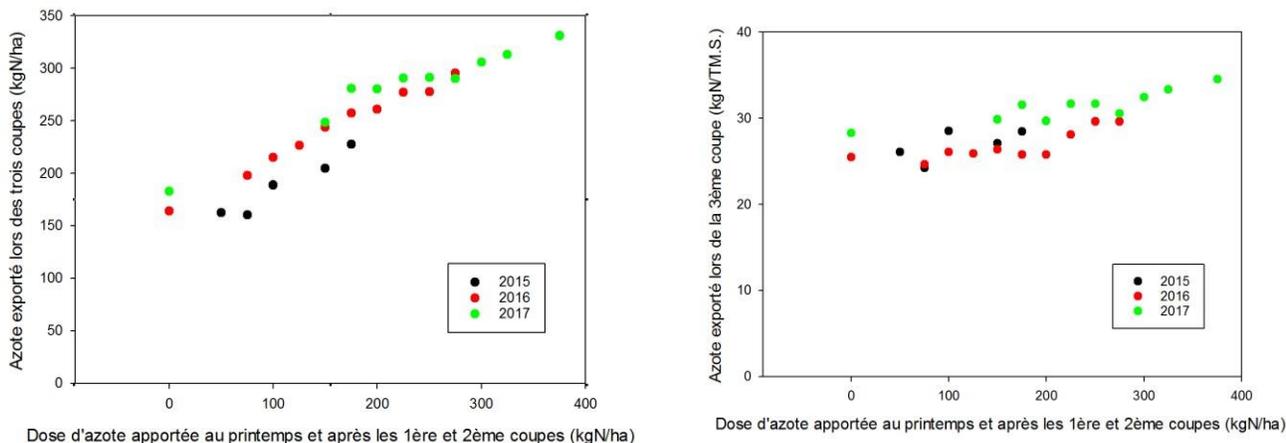


Figure 17. Prélèvement d'azote par les récoltes (1<sup>ère</sup> et 2<sup>e</sup> coupe) selon l'azote total apporté



**Figure 18. Prélèvement d'azote par les récoltes (trois coupes) selon l'azote total apporté**

### 1.3.3 Bilan azoté et impact environnemental

Dans le cadre de ce projet, nous n'avons pas mesuré les reliquats de nitrates présents dans les sols après les récoltes et à la fin de la saison. L'impact environnemental de l'augmentation des doses d'azote n'a pas été directement mesuré, aussi nous avons fait des calculs pour estimer cet impact.

Le premier calcul que nous avons effectué est le bilan azoté qui se calcule comme suit :

$$\text{Bilan azoté (kg N/ha)} = \text{Apport d'azote (kg N/ha)} - \text{Azote prélevé (exporté si pas de pertes au champ) par la récolte (kg N/ha)}$$

Les figures Figure 19, Figure 20 et Figure 21 présentent les bilans azotés d'un système à une coupe, deux coupes et trois coupes. Lors de la première coupe, le bilan nul a été atteint avec un apport d'azote d'environ 124 kg N/ha (Figure 17), dans un système à deux coupes, le bilan nul a été atteint avec un apport d'azote d'environ 200 kg N/ha (Figure 18), dans un système à trois coupes le bilan nul a été atteint avec un apport d'azote d'environ 300 kg N/ha (Figure 18). Avec des apports plus élevés d'azote, le bilan devenait positif.

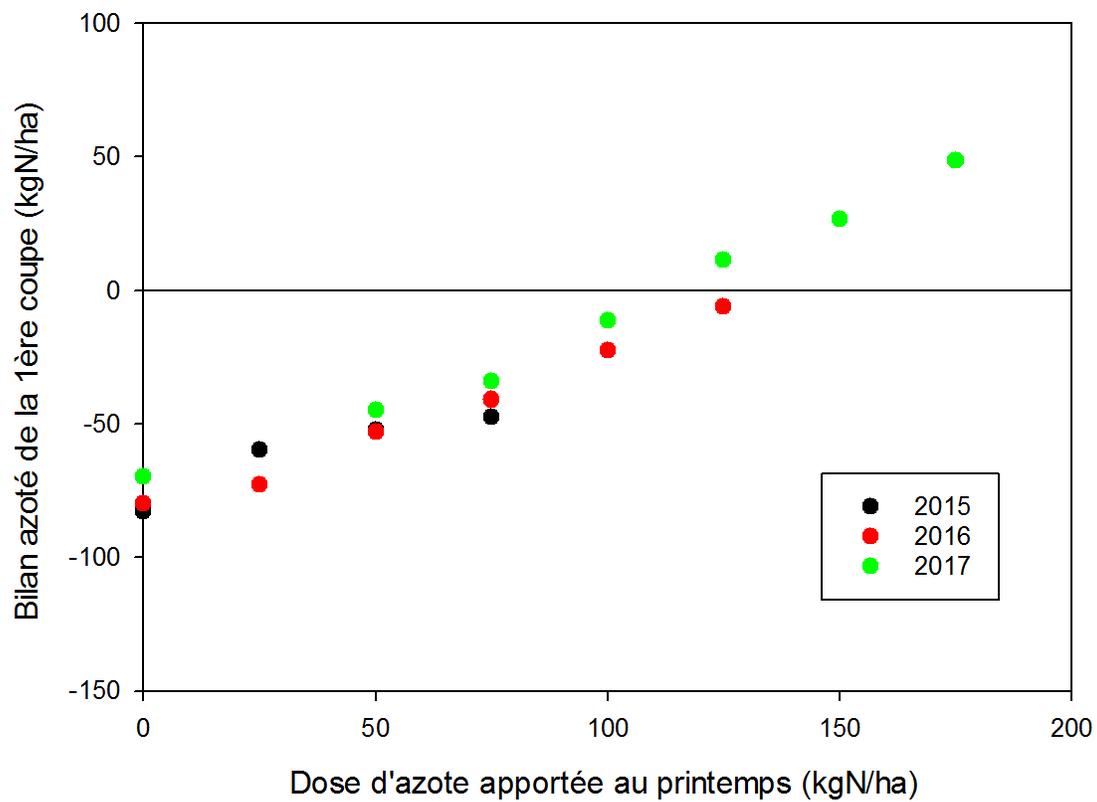


Figure 19. Bilan azoté (1<sup>ère</sup> coupe) selon l'azote total apporté

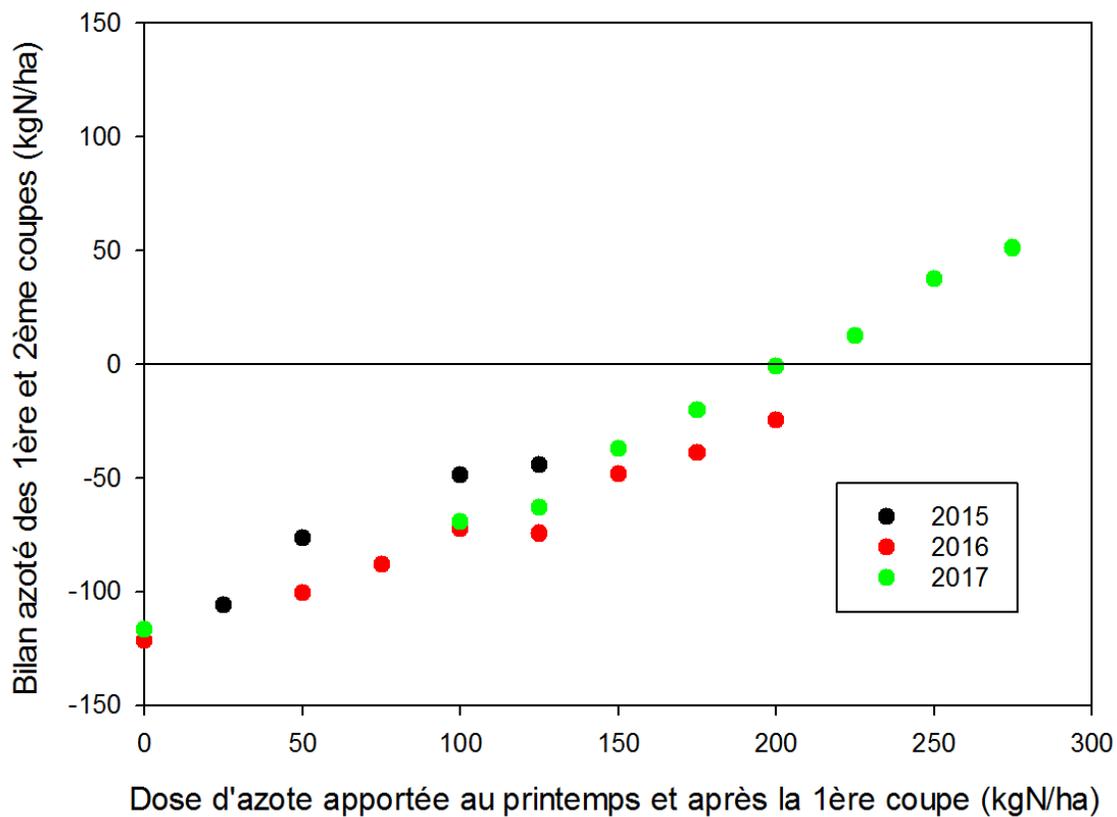
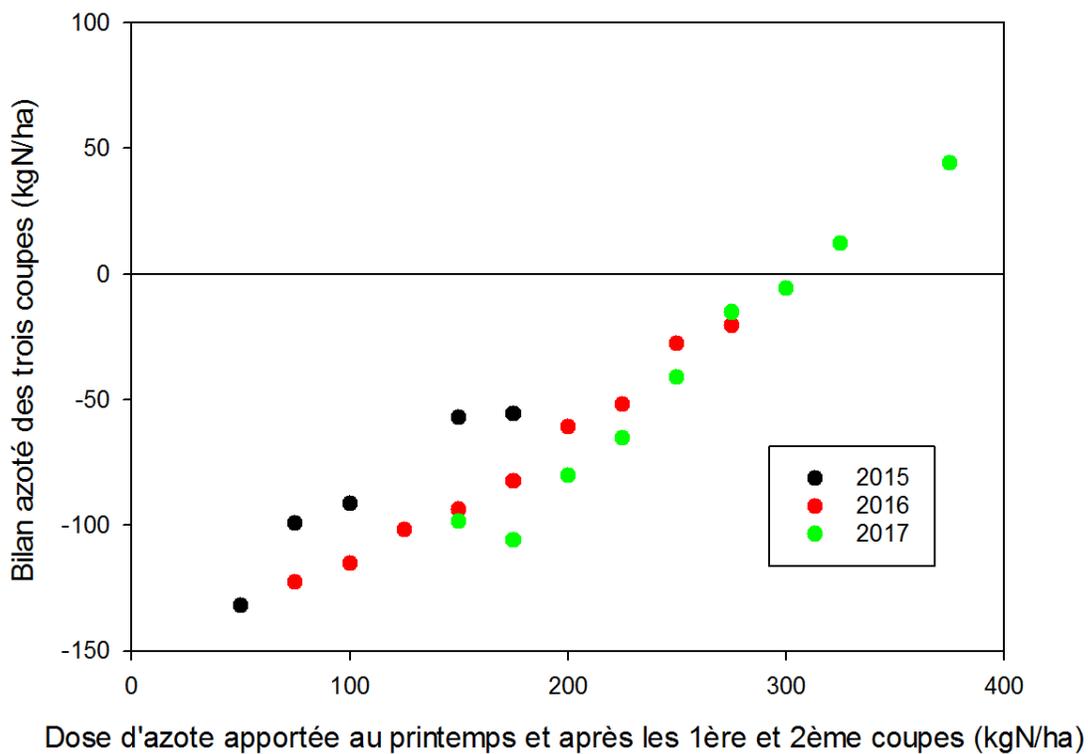


Figure 20. Bilan azoté (1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> coupes) selon l'azote total apporté



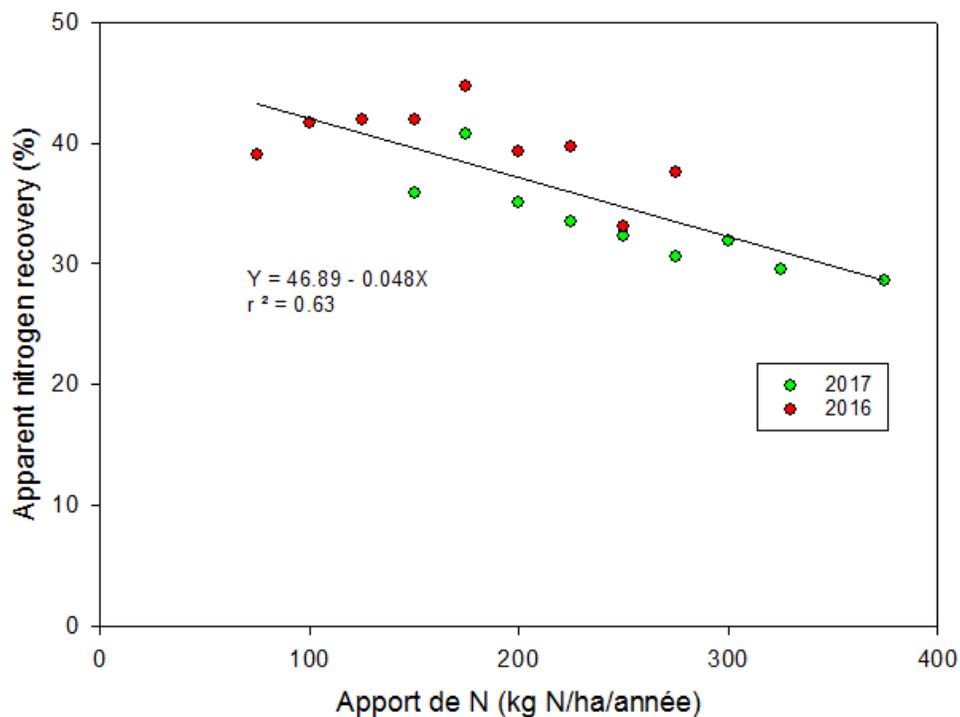
**Figure 21. Bilan azoté (1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> coupes) selon l'azote total apporté**

Il est possible de se demander ce que devient l'azote fourni par le sol (équivalent à l'azote prélevé par la récolte sans aucun apport, 0 N). Pour les prairies où nos essais ont eu lieu (prairies de plus de 3 ans), ces apports d'azote du sol étaient d'environ 80 kg N/ha pour une coupe, 120 kg N/ha pour 2 coupes et 160 kg N/ha pour 3 coupes.

Aussi, en plus du bilan azoté, nous avons calculé ce que l'on nomme en anglais le « apparent nitrogen recovery » qu'on pourrait traduire par la « taux de récupération apparente de l'azote » appliqué au champ qui se calcule comme suit :

$$ANR_x = [(kg \text{ of N exporté pour une dose } N_x - kg \text{ of N exporté sans apport d'azote } N_0) / kg \text{ N appliqué à } N_x] \times 100,$$

Avec x = Taux N appliqué >0.



**Figure 22. Utilisation apparente de l'azote selon l'azote total apporté**

Comme les niveaux d'azote exporté étaient très élevés sans aucun apport d'azote, le pourcentage d'azote apparent apporté par les engrais et potentiellement retrouvé dans les plantes était faible. Ainsi pour des apports d'azote minéral de 75 kg N/ha à environ 150 kg N/ha (pour 3 coupes) de 39 à 43 % de l'azote prélevé par les plantes venait apparemment des apports d'engrais.

Lorsque les apports d'engrais minéraux étaient au-dessus de 150 kg N/ha (pour 3 coupes), c'est moins de 40 % de cet engrais qui est apparemment prélevés par les plantes. Ce qui revient à dire que plus de la moitié de l'azote apporté par les engrais minéraux pourrait ne pas avoir été prélevé par la culture et donc s'être retrouvé dans l'environnement, ce qui correspond à des quantités non négligeable. Ainsi pour un apport de 160 kg N/ha (pour 3 coupes), 88 kg N/ha n'ont pas été prélevés par la plante et pour un apport de 250 kg N/ha, ce sont 137 kg N/ha qui n'a pas été prélevés.

Ces niveaux d'ANR sont plus bas que ceux obtenus par Hall et coll. 2003 (Tableau 7), mais les parcelles de graminées pures sur lesquelles Hall et coll. ont travaillé avaient moins de 3 ans (implantation en 1998, essais de fertilisation en 1999, 2000 et 2001), les rendements étaient donc possiblement plus bas sans apport azoté (rendement non fourni dans l'article) et l'apport de la matière organique sol possiblement moindre.

**Tableau 7. Utilisation apparente de l'azote selon l'azote total apporté (Hall et coll. 2013)**

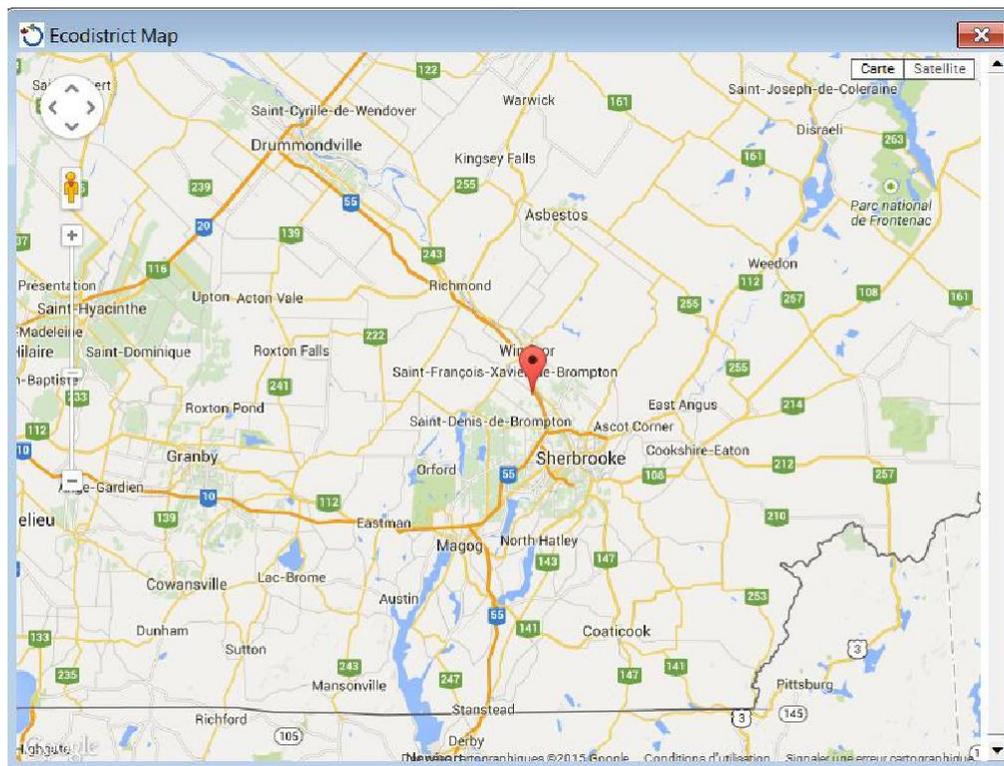
Source: (Hall et coll. 2013)

Taux d'application d'azote Kg N /ha	Nombre de récolte par an		Apparent N recovery
	Trois récoltes	Quatre récoltes	
<b><u>Dactyle pelotonné</u></b>			
134	46.6	58.2	
268	57.7	80.1	
402	41.9	56.9	
LSD (0.05)	6.2	7.0	
<b><u>Fétuque élevée</u></b>			
134	49.2	53.6	
268	64.1	73.6	
402	47.2	54.4	
LSD (0.05)	4.4	6.3	
<b><u>Fléole des prés</u></b>			
134	44.3	53.9	
268	51.9	54.7	
402	33.7	42.5	
LSD (0.05)	7.9	7.2	
<b><u>Toutes les espèces et tous les taux d'azote</u></b>			LSD (0.05)
	49.1	58.6	6.6

### 1.3.4 Impact sur les gaz à effet de serre

Pour vérifier l'impact sur les gaz à effet de serre de l'utilisation de l'azote dans les prairies de graminées des scénarios des références ont été établis en utilisant l'outil d'évaluation et de réduction des émissions de gaz à effet de serre des fermes agricoles : le logiciel HOLOS d'Agriculture et Agro-Alimentaire Canada, version 3.0.3 de septembre 2017.

Les scénarios de références ont été établis pour une seule zone agricole, l'écodistrict 483 dont le point central est situé à proximité de Sherbrooke.



**Figure 23. Point de l'écodistrict # 483.**

Source : HOLOS, version 3.0.3 Septembre 2017.

La texture du sol retenue, est une texture moyenne, le travail du sol intensif<sup>4</sup>. (Figure 24).

<sup>4</sup> Le type de travail du sol choisi correspond aux pratiques adoptées pour l'ensemble de la zone cultivée, et non pour une culture. Nous avons retenu le travail intensif car les fermes laitières utilisent encore majoritairement le labour.

Fichier Fenêtre Outils Résultats Aide

Ferme Cultures Bovins Produits laitiers Porc Mouton Volaille Autres animaux

Détails  Oui  Non

Renseignements sur ferme

Nom de ferme 2018-INA\_scenario refer prairie gram

Année de ferme 2018 Version Holos 3.0.3 septembre 2017

Écodistrict 483 Carte des écodistrict Système de mesure Metric

Province Québec

Écozone Atlantic Maritimes

Description

Texture du sol Moyenne Facteur de rapport pour la texture 0,8

Type de sol Est du Canada Facteur de rapport pour le travail du sol 1,0

Pratiques de gestion du travail du sol

Intensité actuelle Intensif

Intensité antérieure Intensif

LumCMax -246

Constante de taux 0,0227

Variables du sol

EF Eco (kg N2O-N kg<sup>-1</sup> N) 0,0158

Leaching Fraction 0,2801

EF Leaching (kg N2O-N kg<sup>-1</sup> N) 0,0075

Fraction de volatilisation 0,10

Facteur d'émissions de la volatilisation (kg N2O-N kg<sup>-1</sup> N) 0,0100

Variables climatiques

Précipitations (mm) 550

Évapotranspiration potentielle (mm) 586

Topographie

F Topographie 27,82

Potentiels de réchauffement planétaire

CO2 1

CH4 28

N2O 265

Variables mensuelles

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	
Répartition du N2O dans les sols	0,00	0,00	5,00	30,00	20,00	15,00	5,00	5,00	15,00	5,00	0,00	0,00	100
Température moyenne (C)	-11,1	-9,7	-3,2	4,7	12,0	17,2	20,0	18,5	13,5	7,6	0,7	-7,7	

Figure 24. Caractéristique de la ferme retenue pour les scénarios.

Source : HOLOS, version 3.0.3 Septembre 2017.

Pour les scénarios de référence, seule la culture analysée a été scénarisée. Ainsi, dans les scénarios, il n'y a que la prairie de graminée d'inscrite et rien d'autre (pas d'autre culture et pas d'animaux).

### 1.3.4.1 Scénario 1. Référence pour une prairie de 100 ha (3 coupes) avec un apport de 160 kg N/ha d'azote

Le rendement retenu pour 3 coupes de foin est de 6 T/ha de M.S. (100 %) et la superficie de 100 ha (pour un rendement total de 600 T de foin sec).

La fertilisation azotée appliquée a été de 160 kg N/ha (recommandation généralement retenue par les conseillers agricoles) et la fertilisation phosphatée de 40 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. La teneur en azote retenue dans la biomasse aérienne a été de 24 mg N g<sup>-1</sup> M.S. ou N exporté kg/T foin M.S. ou de 0,024 kg N/kg de biomasse aérienne (au lieu de 0,016 fourni par le logiciel). Pour la biomasse souterraine, nous avons laissé le chiffre du logiciel soit 0,001. Les autres paramètres ont été ceux fournis par défaut par HOLOS (Tableau 8).

**Tableau 8. Caractéristique d'une prairie (3 coupes) pour le scénario de référence avec 160 kg N/ha d'azote.**

Source : HOLOS, version 3.0.3 Septembre 2017.

Fichier Fenêtre Outils Résultats Aide																
Ferme Cultures Bovins Produits laitiers Porc Mouton Volaille Autres animaux																
Détails <input checked="" type="radio"/> Oui <input type="radio"/> Non																
Fourrages vivaces, Luzerne, Foin cultivé																
Type	Superficie (ha)	Année d'ensemencement	Longueur du peuplement	Rendement (kg ha <sup>-1</sup> )	Irrigué	Herbicide	Taux de fertilisation azotée (kg N/ha)	Taux de fertilisation au phosphore (kg P2)	Teneur en eau (w/w)	Teneur en azote des résidus aériens (kg N/ha)	Teneur en N des résidus souterrains (kg N/ha)	Rapport de rendement	Rapport des résidus aériens	Rapport des résidus souterrains	Energie en carburant (GJ ha <sup>-1</sup> )	Energie pour l'herbicide (GJ ha <sup>-1</sup> )
Foin - graminée	100,0	2013	5	6000,0	Non	Non	160	40	0,00	0,0240	0,0100	0,18	0,12	0,70	0,81	0,00
Aucun	0,0	1990	5	0,0	Non	Non	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	1990	5	0,0	Non	Non	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	1990	5	0,0	Non	Non	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	1990	5	0,0	Non	Non	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
LumCMax	4813	* Rendement des semences des cultures fourragères														
k	0,0190															

### 1.3.4.2 Scénario 2. Référence pour une prairie de 100 ha (3 coupes) avec un apport de 224 kg N/ha d'azote

Le rendement retenu pour 3 coupes de foin est de 10 T/ha de M.S. (100 %) et la superficie de 100 ha (pour un rendement total de 1 000 T de foin sec)



La fertilisation azotée appliquée a été de 224 kg N/ha et la fertilisation phosphatée de 40 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. La teneur en azote retenue dans la biomasse aérienne a été de 27,5 mg N g<sup>-1</sup> MS ou N exporté kg/T foin MS ou de 0,0275 kg N/kg de biomasse aérienne (au lieu de 0,016 fourni par le logiciel). Pour la biomasse souterraine, nous avons laissé le chiffre du logiciel soit 0,001. Les autres paramètres ont été ceux fournis par défaut par HOLOS (Tableau 9).

**Tableau 9. Caractéristique d'une prairie 3 coupes pour le scénario augmenté avec 224 kg N/ha d'azote (100 ha).**

Source : HOLOS, version 3.0.3 Septembre 2017.

Fichier Fenêtre Outils Résultats Aide																
Ferme Cultures Bovins Produits laitiers Porc Mouton Volaille Autres animaux																
Détails <input checked="" type="radio"/> Oui <input type="radio"/> Non																
Fourrages vivaces, Luzerne, Foin cultivé																
Type	Superficie (ha)	Année d'ensemencement	Longueur du peuplement	Rendement (kg ha <sup>-1</sup> )	Irrigué	Herbicide	Taux de fertilisation azotée (kg N ha)	Taux de fertilisation au phosphore (kg P2)	Teneur en eau (w/w)	Teneur en azote des résidus aériens (kg N)	Teneur en N des résidus souterrains (kg N)	Rapport de rendement	Rapport des résidus aériens	Rapport des résidus souterrains	Énergie en carburant (GJ ha <sup>-1</sup> )	Énergie pour l'herbicide (GJ ha <sup>-1</sup> )
Foin - graminée	100,0	2013	5	10000,0	Non	Non	224	40	0,00	0,0275	0,0100	0,18	0,12	0,70	0,81	0,00
Aucun	0,0	1990	5	0,0	Non	Non	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	1990	5	0,0	Non	Non	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	1990	5	0,0	Non	Non	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
LumCMax	4813															
k	0,0190															

\* Rendement des semences des cultures fourragères

### 1.3.4.3 Scénario 3. Référence pour une prairie de 60 ha (3 coupes) avec un apport de 224 kg N/ha d'azote

Le rendement retenu pour 3 coupes de foin est 10 T/ha de M.S. (100 %), nous avons donc réduit la superficie à 60 ha (même rendement de 600 T de foin sec au total)

La fertilisation azotée appliquée a été de 224 kg N/ha et la fertilisation phosphatée de 40 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. La teneur en azote retenue dans la biomasse aérienne a été de 27,5 mg N g<sup>-1</sup> MS de 0,0257 kg N/kg de biomasse aérienne (au lieu de 0,016 fourni par le logiciel). Pour la biomasse souterraine, nous avons laissé le chiffre du logiciel soit 0,001. Les autres paramètres ont été ceux fournis par défaut par HOLOS (Tableau 10).

**Tableau 10. Caractéristique d'une prairie 3 coupes pour le scénario augmenté avec 224 kg N/ha d'azote (60 ha).**

Source : HOLOS, version 3.0.3 Septembre 2017.

Ferme Cultures Bovins Produits laitiers Porc Mouton Volaille Autres animaux																
Détails <input checked="" type="radio"/> Oui <input type="radio"/> Non																
Fourrages vivaces, Luzerne, Foin cultivé																
Type	Superficie (ha)	Année d'ensemencement	Longueur du peuplement	Rendement (kg ha <sup>-1</sup> )	Irrigué	Herbicide	Taux de fertilisation azotée (kg N ha)	Taux de fertilisation au phosphore (kg P2)	Teneur en eau (w/w)	Teneur en azote des résidus aériens	Teneur en N des résidus souterrains (kg N/ha)	Rapport de rendement	Rapport des résidus aériens	Rapport des résidus souterrains	Energie en carburant (GJ ha <sup>-1</sup> )	Energie pour l'herbicide (GJ ha <sup>-1</sup> )
Foin - graminée	60,0	2013	5	10000,0	Non	Non	224	40	0,00	0,0275	0,0100	0,18	0,12	0,70	0,81	0,00
Aucun	0,0	1990	5	0,0	Non	Non	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	1990	5	0,0	Non	Non	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	1990	5	0,0	Non	Non	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	1990	5	0,0	Non	Non	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
LumCMax	4813	* Rendement des semences des cultures fourragères														
k	0,0190															

## Résumé des scénarios

	Scénarios		
	1	2	3
Rendements (t/ha M.S.)	6	10	10
Superficie (ha)	100	100	60
Fertilisation azoté (kg/ha)	160	224	224
Fertilisation phosphaté (kg/ha)	40	40	40
Teneur en azote de la biomasse aérienne (mg N g <sup>-1</sup> M.S.)	24	27,5	27,5
Teneur en azote de la biomasse souterraine	0,001	0,001	0,001

### 1.3.4.4 Comparaison de la production et de la séquestration des gaz à effet de serre selon les trois scénarios

Les résultats de production des gaz à effet de serre des trois scénarios précédents sont présentés au **Tableau 11**. L'augmentation de la fertilisation azotée (sur une même superficie de 100 ha), même si elle s'accompagne d'une augmentation de rendement (de 6 T de M.S. /ha à 10 T de M.S. /ha), correspond à une augmentation importante des émissions de gaz à effet de serre (de 262 T CO<sub>2</sub> équivalent /an à 402 T CO<sub>2</sub> équivalent /an). De plus, les émissions ou la séquestration nette de CO<sub>2</sub>, de la prairie fertilisée avec 160 kg N/ha, sont plus faible. Globalement la prairie fixe plus d'azote qu'elle n'en émet (- 46 T CO<sub>2</sub> équivalent / an). Par contre, lorsque la prairie est fertilisée avec 224 kg N/ha, elle a une émission net plus élevé, globalement la prairie émet plus d'azote qu'elle n'en fixe (94 T CO<sub>2</sub> équivalent / an).

Si on considère que l'augmentation de rendement permet de réduire la superficie en culture (passer de 100 ha à 60 ha, car 6T/ha\*100 ha = 10T/ha\*60 ha) alors la production de gaz à effet de serre est équivalente. Par contre, si les 40 ha qui ne sont plus utiles pour obtenir les rendements, ne sont plus en prairie mais mis en cultures annuelles, ils ne séquestreront plus de carbone, il y aura alors une augmentation nette de gaz à effet de serre. Si, au contraire, ces terres sont reboisées alors la séquestration de carbone sera plus importante.

Selon les scénarios de 63 % (moins d'azote apporté) à 65 % des gaz à effet de serre émis (CO<sub>2</sub> équivalent) proviennent de la production directe de N<sub>2</sub>O. Cette augmentation est liée au fait que les concepteurs du logiciel considèrent que la « *quantité de N<sub>2</sub>O produite est à peu près proportionnelle à la quantité d'azote ajoutée dans le sol. Ainsi, puisque la quantité d'azote ajoutée augmente pour*

*obtenir des rendements toujours plus élevés, il en va de même des pertes sous forme de N<sub>2</sub>O dans l'atmosphère* ». (Little et coll. 2008). Le reste des gaz à effet de serre émis proviennent des apports indirects de N<sub>2</sub>O (13 %) et de l'utilisation d'énergie pour la production des engrais azotés et phosphatés (23 à 25 %).

Les résultats du calcul de HOLOS ne tiennent pas compte de la réduction potentielle de l'utilisation des tracteurs pour obtenir la même quantité de foin (600 T avec 60 ou 100 ha) et nous n'avons pas la capacité de simuler nous même un tel scénario. Aussi, le modèle ne semble pas tenir compte d'un potentiel de séquestration du carbone atmosphérique supplémentaire avec la production de rendement en graminées plus élevés avec l'ajout de fertilisant azoté.

**Tableau 11. Résumé des émissions en équivalent CO<sub>2</sub> pour une prairie de graminée fertilisée avec différents taux d'azote (3 coupes) et selon différentes superficies**

Source : HOLOS, version 3.0.3 Septembre 2017.

	Superficie	Fertilisation azotée	Rendement (100% M.S)	Direct N <sub>2</sub> O	Indirect N <sub>2</sub> O	Énergie CO <sub>2</sub>	Émission totale de CO <sub>2</sub>	Séquestration de CO <sub>2</sub>	Émission ou séquestration net de de CO <sub>2</sub>
	ha	Kg N/ha	T/ha	T/an				T/an	T/an
<b>Scenario 1 de base</b>	100	160	6	164 (63%)	33 (13%)	65 (25%)	<b>262</b>	<b>308</b>	<b>-46</b>
<b>Scenario 2 augmenté</b>	100	224	10	262 (65%)	52 (13%)	88 (22%)	<b>402</b>	<b>308</b>	<b>94</b>
<b>Scenario 3 augmenté</b>	60	224	10	157 (65%)	31 (13%)	53 (22%)	<b>241</b>	<b>185</b>	<b>56</b>

Afin de réduire les gaz à effets de serre, il ne s'agit pas seulement de réduire les apports d'azote/ha, mais aussi de tenir compte de la superficie cultivée. Il pourrait être avantageux pour les producteurs de réduire la superficie cultivée, mais d'augmenter les apports d'azote. De cette façon ils obtiendraient des coûts plus faibles, ils émettraient moins de gaz à effet de serre pour le même rendement.

### 1.3.5 Indice de nutrition azoté

#### 1.3.5.1. Utilisation de l'INA mesuré avant la 1<sup>ère</sup> coupe pour déterminer les besoins en azote de la 2<sup>ème</sup> coupe.

Tel que mentionné au début de ce document, la détermination de l'INA commande de recueillir, lors de l'échantillonnage de la prairie, un minimum de 1T/ha de matière sèche ce qui a lieu généralement à la phase de montaison. La Figure 25 présente les courbes de concentration en azote et en phosphore de la fléole selon le rendement en matière sèche). Cette prise d'échantillons arrive donc trop tardivement pour pouvoir ajuster la fertilisation azotée avant la 1<sup>ère</sup> coupe. Un des objectifs de ce projet était donc de vérifier la possibilité d'utiliser l'INA pour ajuster les besoins en azote lors de la 2<sup>ème</sup> coupe.

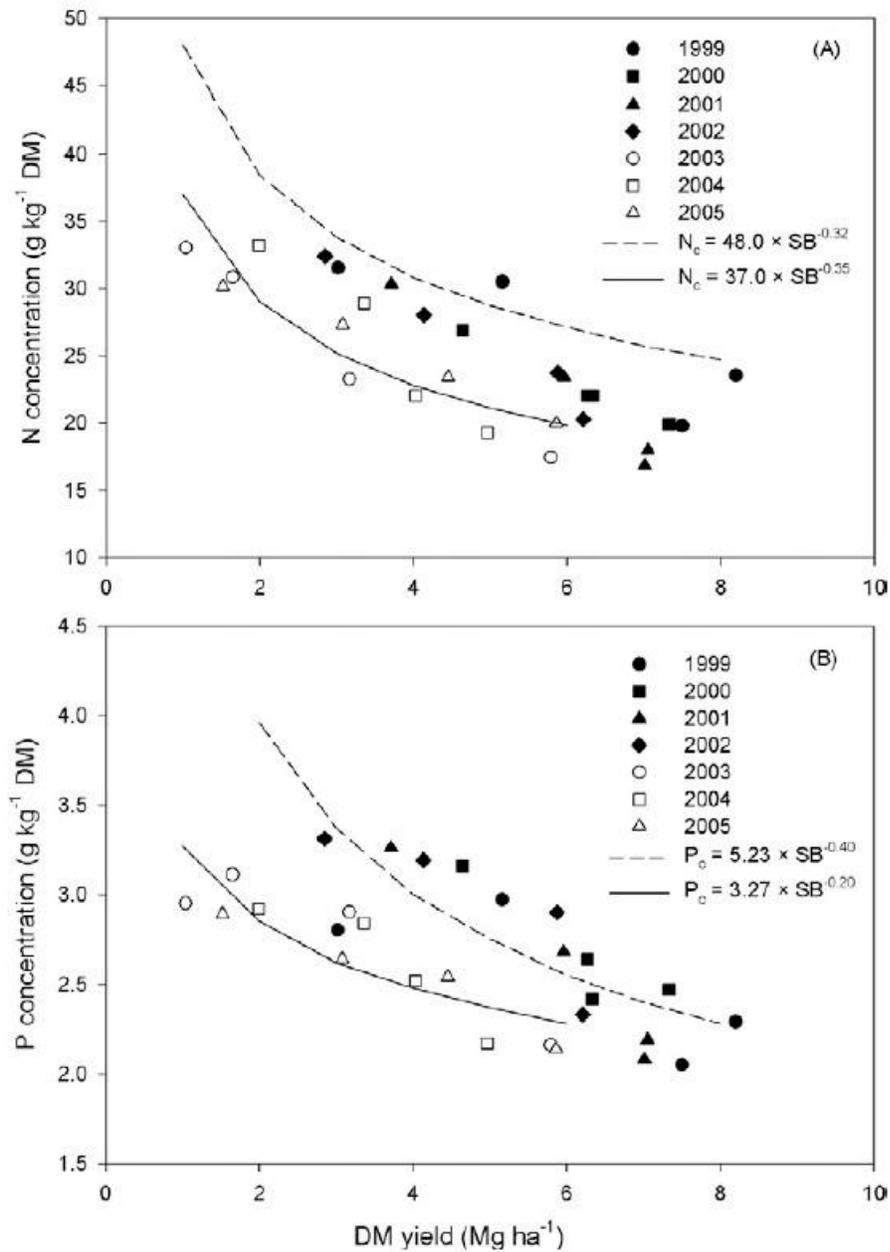


Figure 25. Concentration en azote et en phosphore selon le rendement en matière sèche de la fléole (1<sup>ère</sup> coupe) dans des conditions de croissance non limitantes en azote (120 kg N/ha) et e phosphore.

Source : Bélanger et coll. 2008.

Selon les données que nous avons mesurées, l'INA établie avant la première coupe ne permet pas de déterminer les besoins en azote de la 2<sup>ème</sup> coupe. Il n'y a pas de lien direct entre l'INA avant la coupe, la fertilisation après la coupe et le rendement de la coupe suivante. Les tableaux suivants présentent les augmentations moyennes de rendement à la deuxième coupe par kg d'azote ajouté selon l'INA (en lien avec les apports d'azote à la 1<sup>ère</sup> coupe) et l'ajout d'azote après la 1<sup>ère</sup> coupe (**Tableau 12, Tableau 13, Tableau 14**).

En 2016, lorsque les apports variaient de 25 à 50 kg N/ha après la 1<sup>ère</sup> coupe, l'augmentation du rendement de la 2<sup>ème</sup> coupe, par kg d'azote ajouté, a varié entre 6 et 36 kg M.S. /ha par kg N/ha ceci avec de l'INA similaire (voir Tableau 11 et Figure 26).

Selon ces résultats, il semble difficile d'utiliser la valeur de l'INA établie avant la coupe pour prévoir les besoins en azote de la coupe suivante.

---

<sup>5</sup> Pour une valeur de 27 – 0 – 0 de 2.4 \$/kg N, d'urée avec inhibiteur d'uréase de 1,8 \$/kg N.

**Tableau 12. Augmentation du rendement à la deuxième coupe en 2016 selon l'INA de la 1<sup>ère</sup> coupe pour un apport entre 25 et 50 kg N/ha après la 1<sup>ère</sup> coupe.**

Site	Année	Dose azote appliquée (kg N/ha)	INA	Ajout d'azote (kg N/ha)		Augmentation du rendement (kg M.S. / kg N appliqué) par ha
				Printemps	À la 1 <sup>ère</sup> coupe	
TREMCO	2016	50	0,7		de 25 a 50	35
TREMCO	2016	75	0,7		de 25 a 50	24
TREMCO	2016	100	0,8		de 25 a 50	7
TREMCO	2016	125	0,8		de 25 a 50	24
CRDS	2016	50	0,6		de 25 a 50	19
CRDS	2016	75	0,8		de 25 a 50	27
CRDS	2016	100	0,8		de 25 a 50	6
CRDS	2016	125	0,8		de 25 a 50	4
St_Narci	2016	50	0,8		de 25 a 50	9
St_Narci	2016	75	0,8		de 25 a 50	36
St_Narci	2016	100	1,0		de 25 a 50	7
St_Narci	2016	125	0,9		de 25 a 50	29
St_Isido	2016	50	0,9		de 25 a 50	6
St_Isido	2016	75	0,9		de 25 a 50	20
St_Isido	2016	100	0,9		de 25 a 50	16
St_Isido	2016	125	0,9		de 25 a 50	19

**Tableau 13. Augmentation du rendement à la deuxième coupe en 2016 selon l'INA de la 1<sup>ère</sup> coupe pour un apport entre 50 et 75 kg N/ha après la 1<sup>ère</sup> coupe.**

Site	Année	Dose azote appliquée (kg N/ha)	INA	Ajout d'azote (kg N/ha)	Augmentation du rendement (kg M.S. / kg N appliqué) par ha
		Printemps		À la 1 <sup>ère</sup> coupe	Après 1 <sup>ère</sup> coupe
TREMCO	2016	75	0,7	de 50 a 75	12
TREMCO	2016	100	0,7	de 50 a 75	9
TREMCO	2016	125	0,9	de 50 a 75	-3
CRDS	2016	75	0,7	de 50 a 75	-26
CRDS	2016	100	0,7	de 50 a 75	4
CRDS	2016	125	0,8	de 50 a 75	-3
St_Narci	2016	75	0,9	de 50 a 75	11
St_Narci	2016	100	0,9	de 50 a 75	-1
St_Narci	2016	125	1,0	de 50 a 75	3
St_Isido	2016	75	0,9	de 50 a 75	4
St_Isido	2016	100	0,9	de 50 a 75	-3
St_Isido	2016	125	1,0	de 50 a 75	-11

**Tableau 14. Augmentation du rendement à la deuxième coupe en 2017 selon l'INA de la 1<sup>ère</sup> coupe pour un apport entre 50 et 75 kg N/ha après la 1<sup>ère</sup> coupe.**

Site	Année	Dose azote appliquée (kg N/ha)	INA	Ajout d'azote (kg N/ha)		Augmentation du rendement (kg M.S. / kg N appliqué) par ha
				Printemps	À la 1 <sup>ère</sup> coupe	
Anselme	2017	75	0,9		de 50 à 75	10
Anselme	2017	100	0,9		de 50 à 75	3
Anselme	2017	125	1,0		de 50 à 75	7
Anselme	2017	150	1,0		de 50 à 75	4
Anselme	2017	175	1,0		de 75 à 100	7
St_Marie	2017	75	0,9		de 50 à 75	3
St_Marie	2017	100	0,9		de 50 à 75	20
St_Marie	2017	125	0,9		de 50 à 75	8
St_Marie	2017	150	1,0		de 50 à 75	4
St_Marie	2017	175	1,0		de 75 à 100	6
CRDS	2017	75	1,1		de 50 à 75	-8
CRDS	2017	100	1,1		de 50 à 75	-8
CRDS	2017	125	1,2		de 50 à 75	9
CRDS	2017	150	1,3		de 50 à 75	32
CRDS	2017	175	1,5		de 75 à 100	-12
TREMCO	2017	75	0,9		de 50 à 75	1
TREMCO	2017	100	0,9		de 50 à 75	10
TREMCO	2017	125	1,0		de 50 à 75	6
TREMCO	2017	150	1,1		de 50 à 75	2
TREMCO	2017	175	1,1		de 75 à 100	-9

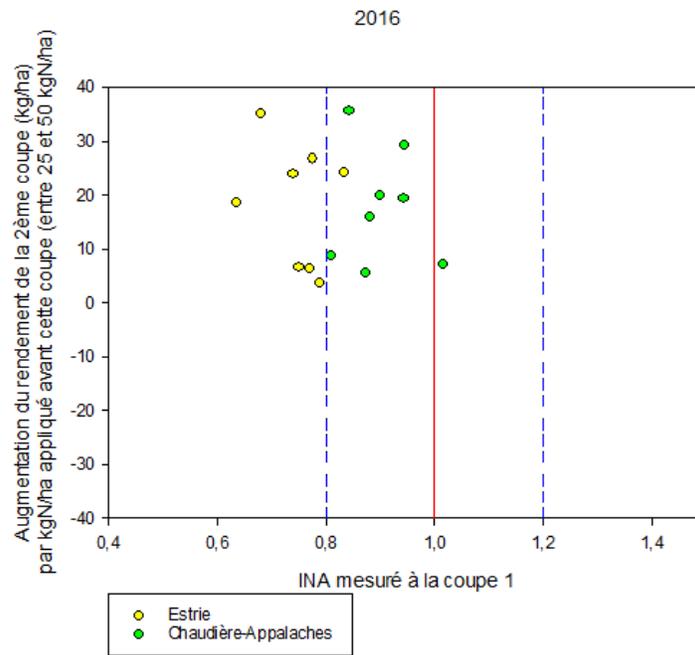


Figure 26. Augmentation du rendement à la deuxième coupe en 2016 selon l'INA de la 1<sup>ère</sup> coupe pour un apport entre 25 et 50 kg N/ha après la 1<sup>ère</sup> coupe.

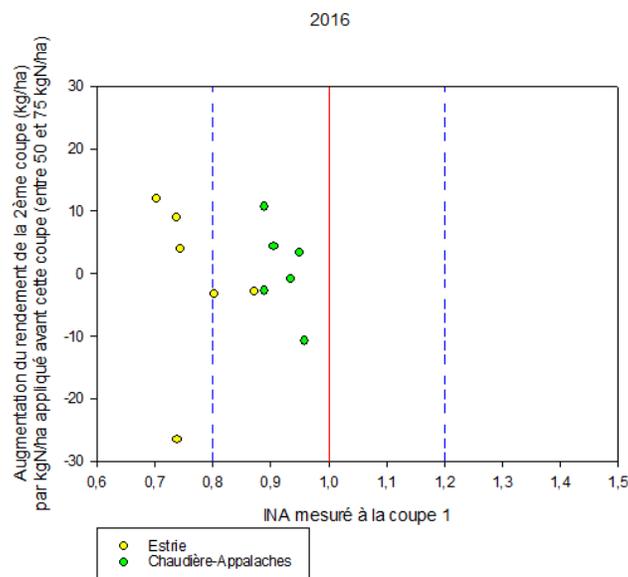


Figure 27. Augmentation du rendement à la deuxième coupe en 2016 selon l'INA de la 1<sup>ère</sup> coupe pour un apport entre 50 et 75 kg N/ha après la 1<sup>ère</sup> coupe.

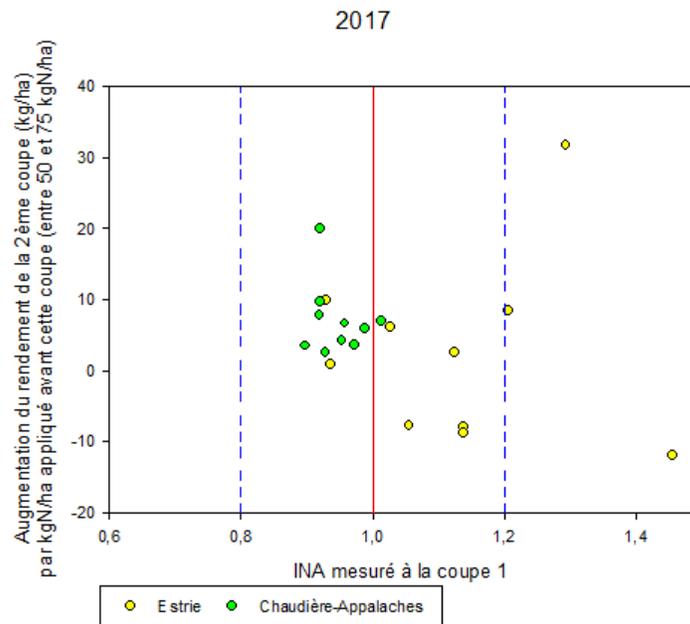


Figure 28. **Augmentation du rendement à la deuxième coupe en 2016 selon l'INA de la 1<sup>ère</sup> coupe pour un apport entre 50 et 75 kg N/ha après la 1<sup>ère</sup> coupe.**

Bien que l'INA reflète l'état nutritionnel en azote, la mesure de celui-ci, avant la coupe, ne nous permet pas de prédire les besoin en azote des prairies de graminées pour la coupe suivante. Par contre, nous pouvons l'utiliser comme outils de sensibilisation. Un producteur qui obtiendrait des INA supérieur ou inférieur à 1 pendant plusieurs années devrait se questionner sur ses apports d'azote.

#### 1.3.5.2. *Utilisation de l'INA mesuré avant la 1<sup>ère</sup> coupe pour valider la fertilisation azotée des prairies.*

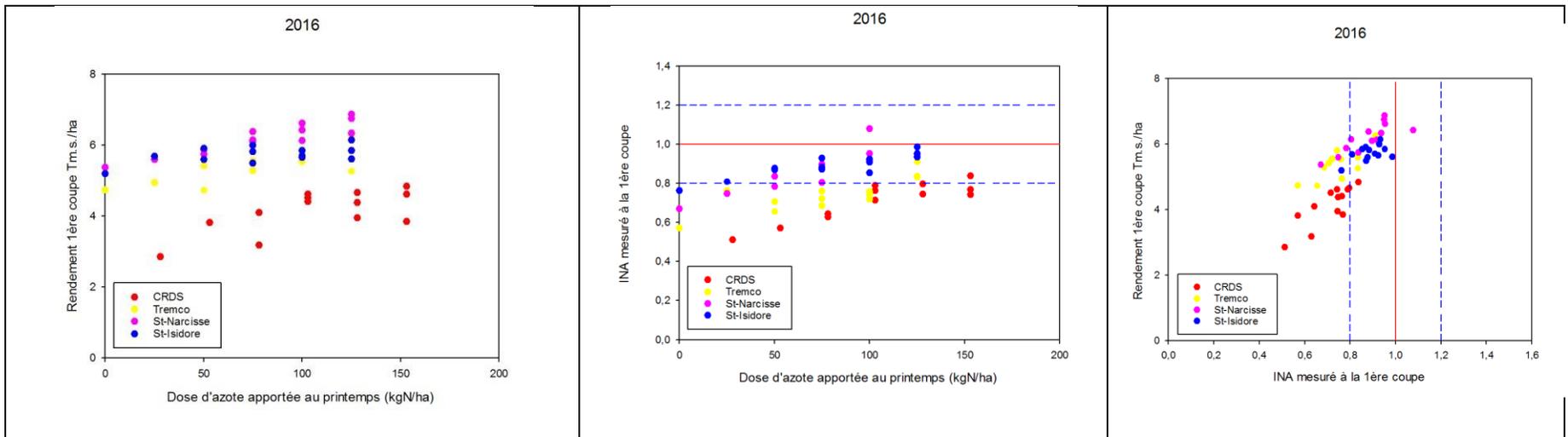
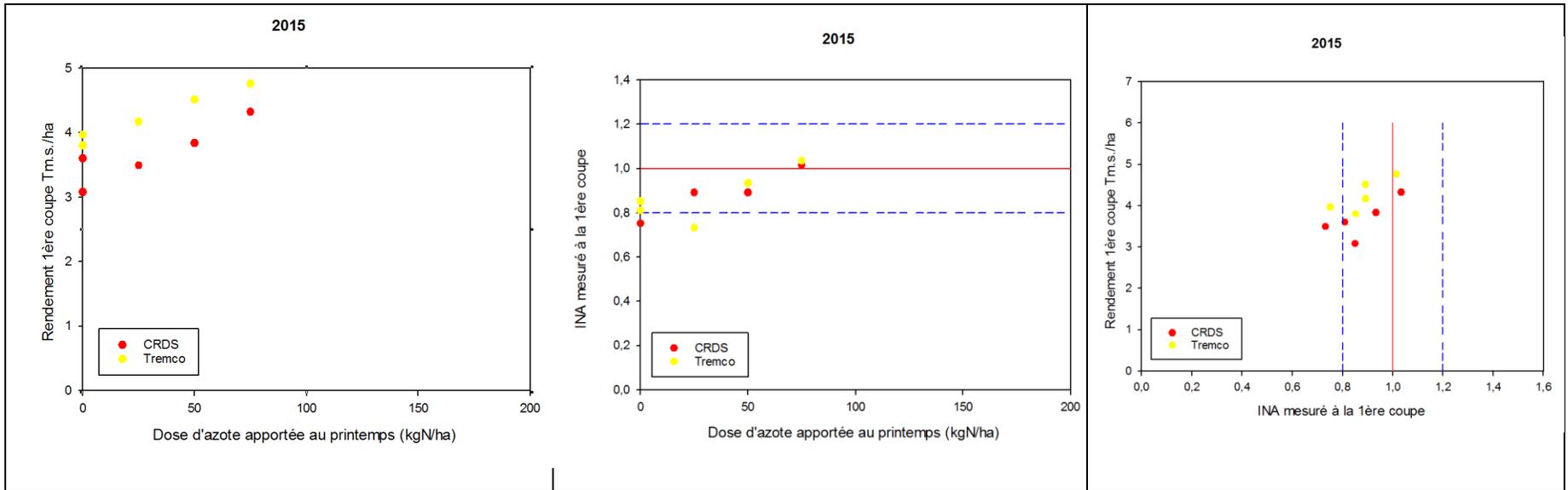
En France, l'INA est utilisé en combinaison avec les indices de nutrition phosphaté (INP) et potassique (INK) pour ajuster la fertilisation de ces trois éléments en fonction de l'état de nutrition constaté à un moment donné. L'indice fourni une idée de l'état de nutrition des plantes (Figure 29) sans toutefois indiquer clairement les doses nécessaire pour corriger cet état.

<b>Interprétation des valeurs de l'INA</b>	
<b>1.2</b>	<b>Excédentaire</b>
<b>1.0</b>	<b>Très satisfaisant</b>
<b>0.8</b>	<b>Satisfaisant</b>
<b>0.6</b>	<b>Insuffisant</b>
<b>0.4</b>	<b>Très insuffisant</b>

(Source : document de vulgarisation français)

Figure 29. **Interprétation des valeurs de l'INA.**

Au Québec, les travaux des Dr. Bélanger et Ziadi ont permis de déterminer les courbes de concentration critique pour l'azote et le phosphore des prairies de graminées. Les essais réalisés dans le cadre de ce projet (Figure 30), confirment que lorsque l'INA dépasse 1, les rendements ont tendance à se stabiliser. L'INA pourrait donc être établie pour un champ de graminée, à chaque coupe, et permettrait de vérifier si la fertilisation apportée cette année-là a été suffisante ou aurait pu être ajustée. Se serait donc un outil de sensibilisation intéressant. La mesure de l'INA à chaque coupe permettrait de discuter de la fertilisation réalisée et des impacts de celle-ci sur la production de gaz à effets de serre.



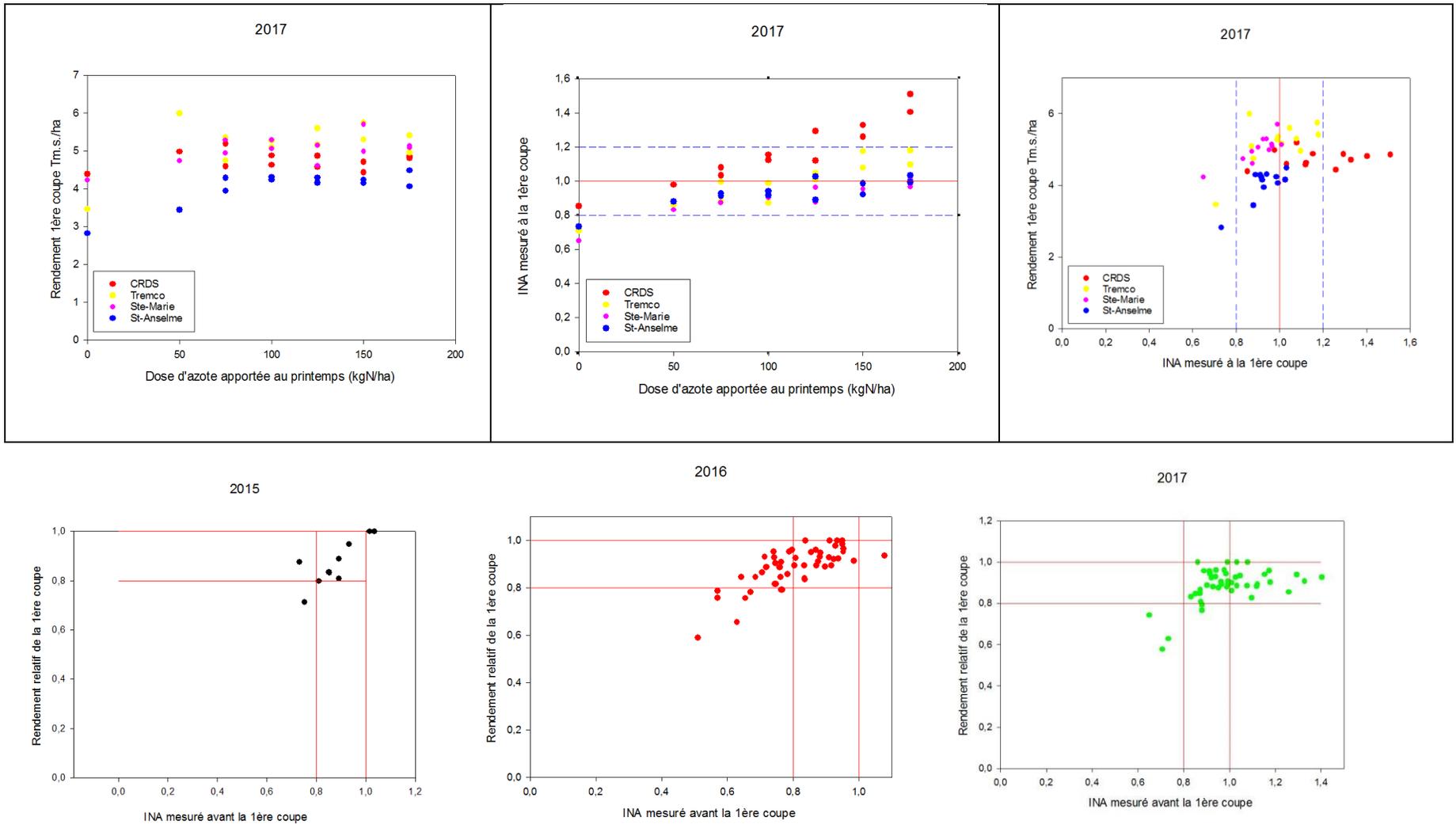


Figure 30. Relation entre les doses d'azotes apportées au printemps, l'INA et le rendement en matière sèche du foin.

### 1.3.6 Analyse économique

Rédigée par Luc Belzile

#### 1.3.6.1. Contexte.

Dans ce projet, il était initialement prévu que l'analyse économique comprendrait 1) l'analyse du potentiel de rentabilité de l'indice de nutrition azotée (INA) et 2) l'évaluation des doses économiques optimales (DÉO) en azote dans les prairies. Puisque les essais relatifs à l'INA n'ont pas permis de prédire les besoins en fertilisation azotée lors de la deuxième coupe dans les prairies, la partie 1) de l'analyse n'est pas possible. Toutefois, la partie 2) sur l'évaluation des DÉO a pu être réalisée.

#### 1.3.6.2. Méthode.

La DÉO a été évaluée en maximisant la fonction de profit dans la culture de prairie, et ce, en utilisant un modèle à un intrant (fertilisation minérale azotée) et un extrant (foin). La procédure se présente comme suit (Debertin, 1986) :

a) La fonction de profit se présente tout d'abord telle que l'équation (1) :

$$\pi = p \cdot y - w \cdot x \quad (1)$$

Où :  $\pi$ , le profit (\$/ha);

$p$ , la valeur du foin (\$/t)

$y$ , la fonction de production ( $x$ ) (courbe de réponse du rendement à la fertilisation minérale azotée) (t/ha);

$w$ , le coût du fertilisant minéral azoté (\$/kg N);

$x$ , la quantité de fertilisant appliquée (kg N/ha).

b) La maximisation s'effectue ensuite selon le système d'équation (2) à (4) :

$$\max_x \pi = p \cdot f(x)' - (w \cdot x)' = 0 \quad (2)$$

$$p \cdot (x)' = w \quad (3)$$

$$f(x)' = \frac{w}{p} \quad (4)$$

Où :  $(x)'$ , la première dérivée de la fonction de production (courbe de réponse);

$(w \cdot x)'$ , la première dérivée de l'équation de coût de fertilisation;

En égalisant à 0 l'équation  $p \cdot f(x)' - (w \cdot x)'$ , on satisfait la condition nécessaire d'un point sur la courbe de profit où la pente égale 0<sup>6</sup>. La DÉO est ensuite simplement estimée en isolant  $x$  de  $(x)'$  suite à l'équation (4). Les courbes de réponse  $(x)$  d'intérêt pour l'évaluation de la DÉO sont celles apparaissant aux Figure 7 Figure 8.

Cela dit, certaines hypothèses ont été retenues dans l'analyse relativement à la valeur du foin et au coût du fertilisant minéral azoté. Concernant la valeur du foin, différentes références existent et présentent une importante hétérogénéité. Dans un analyse comparative publiée par le Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ, 2018), le prix de vente pour les entreprises ayant vendu du foin en 2016 se situait à 109 \$/t. Du côté de la Financière agricole du Québec (FADQ), les prix unitaires utilisés pour évaluer la valeur du foin dans le cadre du programme d'assurance-récolte ont varié de 110 à 142 \$/t entre 2014 et 2018, avec une moyenne de 126 \$/t<sup>7</sup>. L'information recueillie auprès de la FADQ nous apprend que ces valeurs sont ajustées à partir d'une enquête de prix et que cette enquête résulte plutôt en des prix substantiellement plus élevés que les prix unitaires. Enfin, une enquête en cours par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) auprès des entreprises agricoles commerçant du foin semble indiquer des prix passablement plus élevés que les sources citées ci-dessus, mais montrerait également une certaine hétérogénéité (Gendron, 2018). Cette hétérogénéité pourrait s'expliquer par l'activité principale de l'entreprise (ex. : l'entreprise se spécialise-t-elle dans la production de foin ou dans une autre production agricole?), les volumes transigés, le format des balles, les régions ainsi que d'autres facteurs.

Au sujet du prix de l'engrais minéral azoté, les *Références économiques* du CRAAQ (2017) nous indiquent que le prix du nitrate d'ammonium calcique (27-0-0) a varié entre 606 et 701 \$/t entre 2013 et 2017. Dans le cas de l'urée (46-0-0), le prix a plutôt varié entre 654 et 780 \$/t pour la même période. Dans le **Tableau 15**, ces prix sont présentés après conversion de \$/t à \$/kg d'azote (N). Cela dit, pour les fins d'analyse dans les lignes qui suivent, les valeurs médianes sont jugées les plus convenables comme

---

<sup>6</sup> Dans la situation présente, il n'a pas été nécessaire de vérifier mathématiquement la condition suffisante à la maximisation du profit, c'est-à-dire de vérifier que la deuxième dérivée  $(x)''$  soit négative. Cette condition était apparente et évidente.

<sup>7</sup> <https://www.fadq.qc.ca/statistiques/assurance-recolte/prix-unitaires/>

référence, autant pour la valeur du foin (i.e. 175 \$/t) que du fertilisant minéral azoté (2,00 \$/ha).

**Tableau 15. Prix des engrais minéraux azotés au Québec (exprimés en \$/kg d'azote), 2013-2017.**

Années	Type d'engrais	
	27-0-0	46-0-0
2013	2,31	1,67
2014	2,42	1,59
2015	2,93	1,70
2016	2,48	1,53
2017	2,24	1,42
Minimum	2,24	1,42
Maximum	2,93	1,70
Moyenne	2,48	1,58

#### 1.3.6.3. Résultats.

La maximisation de la fonction de profit, selon le système d'équation (1) à (4) et les courbes de réponses des Figure 7 Figure 8, a été opérationnalisée en utilisant l'outil solveur dans le programme Excel. Cet outil sert à minimiser, optimiser ou maximiser une fonction, en présence de contraintes ou non. Aux fins de l'analyse, plusieurs valeurs de foin et de coûts de fertilisant minéral azoté ont été utilisés pour générer des tables de sensibilité. Ces tables sont présentées au **Tableau 16** et présentent les résultats relatifs à la DÉO, au coût de fertilisation minérale azoté ainsi que le résultat de la fonction de profit maximisée. La courbe de réponse du rendement annuel total étant linéaire, il n'a pas été possible de maximiser la fonction de profit pour toute la récolte annuelle.

Les résultats affichés dans le **Tableau 16** montrent tout d'abord les intervalles utilisés quant au prix du foin (125 à 225 \$/t, par tranche de 25 \$/t) et au coût de l'engrais (1,50 à 2,00 \$/kg N, par tranche de 0,25 \$/kg N). On constate tout d'abord

qu'aux valeurs médianes de prix et de coût, la DÉO se situe à 62 kg N/ha en début de saison et à 109 kg N/ha après la première coupe. Ces DÉO correspondent au maximum de l'intervalle des recommandations du *Guide de référence en fertilisation* (CRAAQ, 2010). Aussi, les DÉO varient entre 6 et 93 kg N/ha en début de saison et entre 27 et 154 kg N/ha après la première coupe, et ce, en fonction de différents coûts de l'engrais minéral azoté et de différentes valeurs du foin menant à la maximisation de profit.

Concernant le coût de fertilisation minérale azoté, celui-ci se chiffre à 124 \$/ha en début de saison et à 217 \$/ha après la première coupe lorsqu'on observe les valeurs médianes de coût et de prix. Ces coûts de fertilisation sont passablement plus élevés que ce que l'on trouve dans la référence du CRAAQ (2018), qui rapporte des charges de fertilisants minéraux de 53 \$/ha, même si le prix de l'engrais minéral azoté en 2016 n'était pas particulièrement bas.

Enfin, pour ce qui est de la maximisation du profit aux valeurs médianes de coût et de prix, celle-ci est de 664 \$/ha pour la première coupe et de 1 123 \$/ha pour la deuxième coupe. Ici, on ne peut comparer ces résultats à des références car, par exemple, le CRAAQ (2018) utilise une notion de profit différente, soit la marge sur coût variable. Ici, la notion de profit est utilisée dans un contexte où un seul intrant varie (N), alors que les autres intrants sont maintenus fixes. Cela dit, le profit maximisé peut passer du simple au double selon que les conditions de prix du foin et de coût de l'engrais sont plus ou moins favorables.

#### 1.3.6.4. Discussion et conclusion

Cette analyse économique a permis d'estimer les DÉO pour une coupe et deux coupes dans la culture de prairie. Aux valeurs médianes de valeur du foin et de coût de l'engrais minéral azoté, il fut établi que les DÉO correspondent au maximum de l'intervalle des taux d'application recommandés dans le *Guide de référence en fertilisation* (2010). Toutefois, il est nécessaire d'émettre certaines nuances.

Comme il a été mentionné précédemment, le prix du foin semble afficher une hétérogénéité considérable. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette hétérogénéité et les producteurs et leurs conseillers ont tout avantage à considérer ces facteurs. Par exemple, une entreprise tirant une forte proportion de ses revenus de la vente de foin de haute qualité pour des marchés spécifiques tirera avantage à appliquer des doses plus élevées que la DÉO calculée à partir des valeurs médianes de prix du foin et de coût de l'engrais. Concernant le coût de l'engrais justement, celui-ci varie d'une année à l'autre et c'est aussi un facteur à prendre en compte. Les tables de sensibilité exposées

au **Tableau 16** peuvent servir d'outil d'aide à la décision pour les producteurs et leurs conseillers. Finalement, il est primordial de tenir compte du risque agroenvironnemental dans le processus de décision. L'application d'engrais minéral azoté à des taux d'application trop élevés en regard des besoins de la culture engendre ce genre de risque et il est important de le considérer.

Nous devons maintenant évaluer l'intérêt d'offrir ce service aux producteurs. Pour ce faire un protocole a été mis en place. Dans celui-ci, nous avons établi le nombre de quadra à faucher pour avoir un résultat représentatif. Nous avons évalué la possibilité d'utiliser un échantillon composite afin de limiter le nombre d'analyse de laboratoire (40\$/analyse). Nous évaluerons aussi le temps nécessaire à la réalisation de ce service et le coût qui devrait être demandé au producteur pour le service. Les résultats de cette démarche seront publiés ultérieurement.



**Tableau 16. Dose économique optimale, coût de fertilisation minérale azotée et maximisation du profit à l'égard de la fertilisation azotée des prairies et à deux coupes de récolte.**

	Coût du fertilisant (w) (\$/kg N)	Coupe 1					Coupes 1 +2				
		<i>Valeur du foin (\$/tonne)</i>					<i>Valeur du foin (\$/tonne)</i>				
		125	150	175	200	225	125	150	175	200	225
DÉO (kg N/ha)	1,50	58	71	81	88	93	103	122	136	146	154
	1,75	45	61	71	79	86	84	106	122	134	144
	2,00	32	50	62	71	79	65	91	109	122	133
	2,25	19	39	53	63	71	46	75	95	110	122
	2,50	6	28	44	55	64	27	59	81	98	112
Coût de la fertilisation minérale azotée	1,50	88 \$	107 \$	121 \$	131 \$	139 \$	155 \$	184 \$	204 \$	219 \$	231 \$
	1,75	79 \$	106 \$	125 \$	139 \$	150 \$	147 \$	186 \$	214 \$	235 \$	251 \$
	2,00	65 \$	99 \$	124 \$	143 \$	157 \$	130 \$	181 \$	217 \$	245 \$	266 \$
	2,25	44 \$	88 \$	119 \$	142 \$	161 \$	103 \$	168 \$	214 \$	248 \$	275 \$
	2,50	16 \$	70 \$	109 \$	138 \$	160 \$	67 \$	147 \$	204 \$	246 \$	279 \$
Profit maximisé ( $\pi$ ) (\$/ha)	1,50	470	584	700	818	937	794	987	1184	1383	1584
	1,75	457	567	681	797	915	771	958	1152	1348	1547
	2,00	448	554	664	778	895	752	934	1123	1316	1512
	2,25	441	543	650	762	876	738	913	1097	1287	1481
	2,50	438	534	638	747	859	729	897	1075	1261	1451

## 1.4. Conclusion

Au Québec, la recommandation maximale actuelle en fertilisation pour des prairies ayant moins de 40 % de légumineuses, est de 160 kg N/ha. Pour un régime à deux coupes, la recommandation correspond approximativement aux doses d'azote ayant donné les rendements optimaux dans cette étude. Par contre, dans une régie à trois coupes, la dose d'azote au printemps pourrait être la même que dans une régie à deux coupes soit environ 100 kg N/ha (actuellement 60 kg N/ha). Cette recommandation devrait toutefois être appuyée par un suivi des rendements réels obtenus sur la ferme. En Ontario, la nouvelle recommandation de fertilisation des prairies de graminées fourragères a été basée sur le prélèvement de la culture. Dans les prairies contenant moins de 30 % de légumineuses, il est recommandé d'apporter 23 kg N/ha par tonne de matière sèche prévue. Cette recommandation d'azote, liée au rendement estimé, et à un prélèvement moyen, semble être un bon indice de calcul de la dose de N à appliquer.

De façon générale, le taux de protéine brute du foin récolté augmente avec l'augmentation des apports d'azote. Cette augmentation de la teneur en protéine brute pourrait permettre aux producteurs agricoles de limiter les apports d'intrants protéiques d'autres sources. Une attention particulière doit être portée la fertilisation de la troisième coupe, car le niveau de 17 % de protéine brute (limite du taux dans les ensilages, reliée à la présence de nitrates libres possiblement toxiques pour les animaux) était atteint très rapidement.

Le bilan azoté nul a été atteint avec un apport d'azote d'environ 124 kg N/ha avant la première coupe, avec un apport d'azote d'environ 200 kg N/ha au total pour un système à deux coupes et à 300 kg N/ha dans un système à 3 coupes (rendement total moyen de 11 T/ha de matière sèche). Comme les niveaux de rendement et d'azote exporté étaient très élevés sans aucun apport d'azote, le pourcentage d'azote apparent apporté par les engrais et retrouvé dans les plantes était faible. Ainsi pour un apport de 160 kg N/ha (pour 3 coupes), 88 kg N/ha n'ont pas été prélevés par la plante et pour un apport de 250 kg N/ha, ce sont 137 kg N/ha qui n'a pas été prélevés.

En ce qui concerne la production des gaz à effet de serre (évaluée à partir du logiciel HOLOS) l'augmentation de la fertilisation azotée (sans changement de superficie), même si elle s'accompagne d'une augmentation de rendement, correspond à une augmentation importante de la production de gaz à effet de serre (de 262 T/an à 402 T/an). Si on considère que l'augmentation de rendement permet de réduire la superficie en culture (passer de 100 ha à 60 ha) alors la production de gaz à effet de serre est équivalente. Par contre, l'utilisation future des 40 ha ont un impact sur les émissions nettes ou la séquestration du carbone. Par exemple, si les 40 ha, ne sont plus en prairie, mais mis en cultures annuelles, cela aura un impact sur la séquestration ou émission net du carbone. Il pourrait y avoir alors une augmentation nette de gaz à effet de serre. Si, au contraire, ces terres sont reboisées alors la séquestration de carbone serait probablement plus importante. Près de 65 % des gaz à effet de serre émis (CO<sub>2</sub> équivalent)

proviennent de la production directe de  $N_2O$ . Le reste des gaz à effet de serre émis proviennent des apports indirects de  $N_2O$  (13 %) et de l'utilisation d'énergie pour la production des engrais azotés et phosphatés (23 à 25 %) Selon les données que nous avons mesurées, l'INA établie avant la coupe ne permet pas de déterminer les besoins en azote de la coupe suivante. Les essais réalisés dans le cadre de ce projet confirment que lorsque l'INA dépasse 1, les rendements ont tendance à se stabiliser. L'INA pourrait donc être établie pour un champ de graminée et permettrait de vérifier si la fertilisation apportée cette année-là a été suffisante ou aurait pu être ajustée.

## 2. Essais dans le maïs fourrager

### 2.1. Description des protocoles

Les essais de fertilisation azotée dans le maïs ont été conduits durant 3 années consécutives de 2015 à 2017.

En 2015, il y avait deux sites d'essais en Estrie, sur une ferme à Val-Joli et sur la ferme du Centre de Recherche et développement de Sherbrooke (CDRS) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Un protocole en bloc complet (les blocs étaient perpendiculaires à la pente la plus forte) a été mis en place avec 4 répétitions. Les traitements étaient les suivants :

**Tableau 17. Protocole de fertilisation des parcelles de maïs en 2015**

Site	Fumier à l'automne	Fumier au printemps	Démarrreur au semis	Azote appliqué en post-levée	Total
kg N/ha					
CRDS	T1	50	44	0	<b>94</b>
	T2	50	44	25	<b>119</b>
	T3	50	44	50	<b>144</b>
	T4	50	44	75	<b>169</b>
	T5	50	44	100	<b>194</b>
	T6	0	44	0	<b>44</b>
Site	Fumier à l'automne	Fumier au printemps	Démarrreur au semis	Azote appliqué en post-levée	Total
kg N/ha					
TREMCO	T1	55	39	0	<b>94</b>
	T2	55	39	25	<b>119</b>
	T3	55	39	50	<b>144</b>
	T4	55	39	75	<b>169</b>
	T5	55	39	100	<b>194</b>
	T6	0	39	0	<b>39</b>

Le traitement sans fumier n'était pas en bloc complet, il y a eu 4 répétitions mais sur une bande uniforme située en bordure du site où aucun fumier n'a été appliqué. Le fumier a été appliqué par le producteur avec son épandeur. Les résultats du traitement sans fumier (T6) n'ont pas été analysés statistiquement, ils sont donc fournis seulement à titre indicatif. La valeur d'azote contenu dans le fumier correspond à la valeur fournie par les analyses moins les coefficients de pertes.

En 2016, il y avait deux sites d'essais en Estrie, sur une ferme à Stanstead et sur la ferme du CDRS ainsi que deux sites en Beauce, sur une ferme à Saint-Narcisse et une ferme à Saint-Isidore. Un protocole en bloc complet (les blocs étaient perpendiculaires à la pente la plus forte) a été mis en

place avec 4 répétitions. L'apport de fumier a varié d'un site à l'autre et les traitements étaient les suivants

**Tableau 18. Protocole de fertilisation dans le maïs en 2016**

Site		Fumier à l'automne	Fumier au printemps	Démarrreur au semis	Azote appliqué en post-levée	Total
		<b>Kg N/ha</b>				
CRD S	T1	44	0	50	0	<b>94</b>
	T2	44	0	50	25	<b>119</b>
	T3	44	0	50	50	<b>144</b>
	T4	44	0	50	75	<b>169</b>
	T5	44	0	50	100	<b>194</b>

Site		Fumier à l'automne	Fumier au printemps	Démarrreur au semis	Azote appliqué en post-levée	Total
		<b>Kg N/ha</b>				
LALIBERTÉ	T1	29	0	28	0	<b>57</b>
	T2	29	0	28	25	<b>82</b>
	T3	29	0	28	50	<b>107</b>
	T4	29	0	28	75	<b>132</b>
	T5	29	0	28	100	<b>157</b>

Site		Fumier à l'automne	Fumier au printemps	Démarrreur au semis	Azote appliqué en post-levée	Total
		<b>Kg N/ha</b>				
ST- NARCISSE	T1	33	57	50	0	<b>140</b>
	T2	33	57	50	50	<b>190</b>
	T3	33	57	50	100	<b>240</b>
	T4	33	57	50	150	<b>290</b>
	T5	33	57	50	200	<b>340</b>

Site		Fumier à l'automne	Fumier au printemps	Démarrreur au semis	Azote appliqué en post-levée	Total
		<b>Kg N/ha</b>				
ST- ISIDORE	T1	0	0	13	0	<b>13</b>
	T2	0	0	13	50	<b>63</b>
	T3	0	0	13	100	<b>113</b>
	T4	0	0	13	150	<b>163</b>
	T5	0	0	13	200	<b>213</b>

En 2017, il y avait deux sites d'essais en Estrie, sur une même ferme à Val-Joli et sur la ferme du CDRS ainsi que deux sites en Beauce, sur une ferme à Saint-Odilon et une ferme à Saint-Vallier. Un protocole en bloc complet (les blocs étaient perpendiculaires à la pente la plus forte) a été mis en place avec 3 répétitions en Estrie (plus de traitements) et 4 répétitions en Beauce. Puisque les

traitements de 2015-2016 ne nous ont pas permis d'obtenir les résultats espérés, nous avons modifié les traitements de la façon suivante.

**Tableau 19. Protocole de fertilisation dans le maïs en 2017**

Site	Fumier à l'automne	Fumier au printemps	Démarreur au semis	Azote appliqué en post-levée	Total
	<b>Kg N/ha</b>				
T1 AFD1	0	70	50	0	<b>94</b>
T2 AFD1	0	70	50	50	<b>144</b>
T3 AFD1	0	70	50	100	<b>194</b>
T4 AFD1	0	70	50	150	<b>244</b>
T5 AFD1	0	70	50	200	<b>294</b>
T1 SFD1	0	0	50	0	<b>50</b>
T2 SFD1	0	0	50	50	<b>100</b>
T3 SFD1	0	0	50	100	<b>150</b>
T4 SFD1	0	0	50	150	<b>200</b>
CRDS T5 SFD1	0	0	50	200	<b>250</b>
T1 AFD2	0	70	25	0	<b>69</b>
T2 AFD2	0	70	25	50	<b>119</b>
T3 AFD2	0	70	25	100	<b>169</b>
T4 AFD2	0	70	25	150	<b>219</b>
T5 AFD2	0	70	25	200	<b>269</b>
T1 SFD2	0	0	25	0	<b>25</b>
T2 SFD2	0	0	25	50	<b>75</b>
T3 SFD2	0	0	25	100	<b>125</b>
T4 SFD2	0	0	25	150	<b>175</b>
T5 SFD2	0	0	25	200	<b>225</b>

Site	Fumier à l'automne	Fumier au printemps	Démarreur au semis	Azote appliqué en post-levée	Total
		<b>Kg N/ha</b>			
T1 AFD1	0	60	50	0	<b>110</b>
T2 AFD1	0	60	50	50	<b>160</b>
T3 AFD1	0	60	50	100	<b>210</b>
T4 AFD1	0	60	50	150	<b>260</b>
T5 AFD1	0	60	50	200	<b>310</b>
T1 SFD1	0	0	50	0	<b>50</b>
T2 SFD1	0	0	50	50	<b>100</b>
T3 SFD1	0	0	50	100	<b>150</b>
T4 SFD1	0	0	50	150	<b>200</b>
T5 SFD1	0	0	50	200	<b>250</b>
T1 AFD2	0	60	25	0	<b>85</b>
T2 AFD2	0	60	25	50	<b>135</b>
T3 AFD2	0	60	25	100	<b>185</b>
T4 AFD2	0	60	25	150	<b>235</b>
T5 AFD2	0	60	25	200	<b>285</b>
T1 SFD2	0	0	25	0	<b>25</b>
T2 SFD2	0	0	25	50	<b>75</b>
T3 SFD2	0	0	25	100	<b>125</b>
T4 SFD2	0	0	25	150	<b>175</b>
T5 SFD2	0	0	25	200	<b>225</b>

Site	Fumier à l'automne	Fumier au printemps	Démarreur au semis	Azote appliqué en post-levée	Total
		<b>Kg N/ha</b>			
T1	0	0	50	0	<b>50</b>
T2	0	0	50	50	<b>100</b>
T3	0	0	50	100	<b>150</b>
T4	0	0	50	150	<b>200</b>
T5	0	0	50	200	<b>250</b>

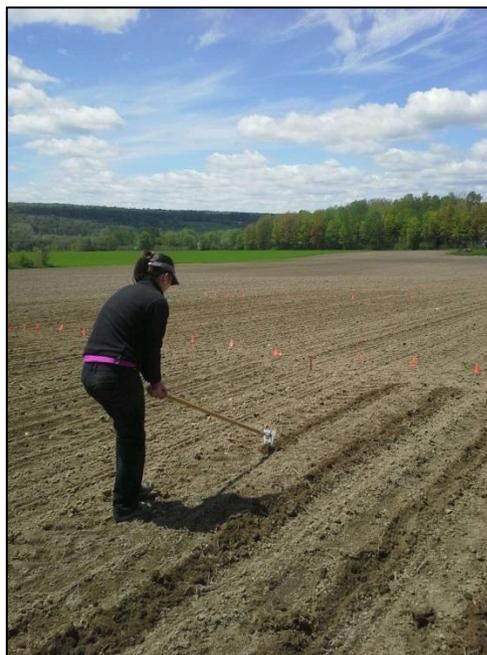
Site	Fumier à l'automne	Fumier au printemps	Démarreur au semis	Azote appliqué en post-levée	Total
		<b>Kg N/ha</b>			
T1	30	0	50	0	<b>80</b>
T2	30	0	50	50	<b>130</b>
T3	30	0	50	100	<b>180</b>
T4	30	0	50	150	<b>230</b>
T5	30	0	50	200	<b>280</b>

En Estrie, en 2015 et 2016, la longueur des parcelles était de 20 m par 11 entre-rangs. Les superficies des parcelles étaient donc de 167,64 m<sup>2</sup> (20m \* (0,762 m\*11) = 167,64 m<sup>2</sup>). En 2017, comme il y avait plus de traitements, la longueur des parcelles était de 13 m par 5 entre-rangs. Le choix de la taille et de la disposition des parcelles a été fait en fonction du champ (superficie disponible, topographie et pédologie). Il n’y avait pas d’espace inter-parcelles à l’exception du sans fumier en 2015.

En Beauce en 2016 et 2017, la longueur des parcelles était de 20 m par 11 entre-rangs. Les superficies des parcelles étaient donc de 167,64 m<sup>2</sup>.

Les besoins en phosphore et en potasse ont été comblés par l’application de fumier ou d’engrais minéraux au printemps (variable selon les sites). Les engrais minéraux ajoutés au printemps ont été mis à la main, à la volée en Estrie.

Les champs étaient ensemencés par les producteurs agricoles et un démarreur était appliqué en bande au semis à 5 cm au côté du sillon où le maïs était semé et à 5 cm sous le niveau de la semence. En 2017, les démarreurs ont été ajoutés à la main et enterrés en bande à côté de la semence en Estrie. Spécifiquement pour l’Estrie, l’azote a été appliqué, en post-levée du maïs, à la main et à la volée, sous forme d’ammonitrate de calcium (27-0-0) en 2015 et sous forme d’urée avec un inhibiteur d’uréase en 2016 et 2017. En Beauce, l’application d’azote (Urée + inhibiteur d’uréase) a été effectué en post-levée, à la volée en surface du sol, au moyen d’un épandeur de précision de marque APV muni d’une rampe d’épandage de 8,38 m de large. La pratique courante est d’appliquer un engrais organique au printemps, un démarreur en bande au semis avec ou sans application d’azote en post-levée du maïs.



**Photo 6. Application du démarreur à la main en bande 23 mai, 2017**

## 2.2. Résultats

### 2.2.1 Résultats en 2015

Tableau 20. Résultats du suivi du maïs ensilage, sur deux sites en Estrie en 2015.

Site : Centre de recherche de Sherbrooke (CRDS) champ J6-O 2015

Fumier automne  (kg N/ha)	Fumier printemps  (kg N/ha)	Azote Démarreur  (kg N/ha)	Total N appliquée avant mesure INA  (kg N/ha)	INA moyen Stade V6	N appliqué en post- levée  (kg N/ha)	Total N  (kg N/ha)	Rendement  (T/ha)	Taux de protéine brute  (%)	N exportée  (kg N/ha)	Bilan  (kg N/ha)
0	0	44	44	0,6	0	44	11,2	7,4	133	-89
0	50	44	94	0,6	0	94	10,9	7,3	127	-33
0	50	44	94	0,7	25	119	10,9	7,2	124	-5
0	50	44	94	0,7	50	144	14,3	7,6	175	-31
0	50	44	94	0,8	75	169	14,5	7,9	182	-13
0	50	44	94	0,7	100	194	14,3	8,3	191	3

Les parcelles sans fumier des deux sites (en bleu) n'ont pas été analysées statistiquement car les répétitions n'étaient pas randomisées (une bande sans fumier)

Site : Ferme TREMCO (Val-Joli) champ 1 2015

Fumier automne  (kg N/ha)	Fumier printemps  (kg N/ha)	Azote Démarreur  (kg N/ha)	Total N appliquée avant mesure INA  (kg N/ha)	INA moyen Stade V6	N appliqué en post- levée  (kg N/ha)	Total N  (kg N/ha)	Rendement  (T/ha)	Taux de protéine brute  (%)	N exportée  (kg N/ha)	Bilan  (kg N/ha)
0	0	39	39	1,1	0	39	18,4	6,3	190	-151
0	55	39	94	1,1	0	94	10,6	6,3	107	-13
0	55	39	94	1,0	25	119	10,7	6,2	107	12
0	55	39	94	1,0	50	144	11,8	6,0	113	31
0	55	39	94	1,0	75	169	10,8	6,0	103	66
0	55	39	94	1,0	100	194	14,1	6,5	148	46

## 2.2.2 Résultats en 2016

Tableau 21. Résultats du suivi du maïs ensilage, sur quatre sites en 2016.

Site : Centre de recherche de Sherbrooke (CRDS) champ J1-J2 2016

Fumier automne (kg N/ha)	Fumier printemps (kg N/ha)	Azote Démarreur (kg N/ha)	Total N appliquée avant V8 (kg N/ha)	INA moyen Stade V8	N appliqué en post-levée (kg N/ha)	Total N (kg N/ha)	Rendement (T/ha)	Taux de protéine brute (%)	N exportée (kg N/ha)	Bilan (kg N/ha)
44	0	50	94	<b>0,8</b>	0	<b>94</b>	<b>18,3</b>	7,2	<b>211</b>	<b>-117</b>
44	0	50	94	<b>0,8</b>	25	<b>119</b>	<b>20,3</b>	6,9	<b>227</b>	<b>-108</b>
44	0	50	94	<b>0,8</b>	50	<b>144</b>	<b>17,8</b>	6,7	<b>189</b>	<b>-45</b>
44	0	50	94	<b>0,9</b>	75	<b>169</b>	<b>19,1</b>	7,4	<b>225</b>	<b>-56</b>
44	0	50	94	<b>0,9</b>	100	<b>194</b>	<b>17,6</b>	6,9	<b>196</b>	<b>-2</b>

Site : Ferme Laliberté (Stanstead) champ 29 2016

Fumier automne (kg N/ha)	Fumier printemps (kg N/ha)	Azote Démarreur (kg N/ha)	Total N appliquée avant V8 (kg N/ha)	INA moyen Stade V8	N appliqué en post-levée (kg N/ha)	Total N (kg N/ha)	Rendement (T/ha)	Taux de protéine brute (%)	N exportée (kg N/ha)	Bilan (kg N/ha)
29	0	28	57	<b>0,9</b>	0	<b>57</b>	<b>19,1</b>	7,5	<b>229</b>	<b>-172</b>
29	0	28	57	<b>0,9</b>	25	<b>82</b>	<b>19,3</b>	8,1	<b>253</b>	<b>-171</b>
29	0	28	57	<b>0,9</b>	50	<b>107</b>	<b>17,4</b>	6,7	<b>190</b>	<b>-83</b>
29	0	28	57	<b>1,0</b>	75	<b>132</b>	<b>17,1</b>	8,0	<b>222</b>	<b>-90</b>
29	0	28	57	<b>1,0</b>	100	<b>157</b>	<b>18,4</b>	7,7	<b>229</b>	<b>-72</b>

**Site : Ferme Donald Dion (St Narcisse) 2016**

Fumier automne (kg N/ha)	Fumier printemps (kg N/ha)	Azote Démarreur (kg N/ha)	Total N appliquée avant V8 (kg N/ha)	INA moyen Stade V8	N appliqué en post-levée (kg N/ha)	Total N (kg N/ha)	Rendement (T/ha)	Taux de protéine brute (%)	N exportée (kg N/ha)	Bilan (kg N/ha)
33	57	50	140	<b>1,0</b>	0	<b>140</b>	<b>18,9</b>	7,4	<b>226</b>	<b>-86</b>
33	57	50	140	<b>1,0</b>	50	<b>190</b>	<b>15,0</b>	5,7	<b>139</b>	<b>51</b>
33	57	50	140	<b>0,9</b>	100	<b>240</b>	<b>19,0</b>	7,2	<b>222</b>	<b>18</b>
33	57	50	140	<b>1,0</b>	150	<b>290</b>	<b>18,5</b>	7,9	<b>233</b>	<b>57</b>
33	57	50	140	<b>1,0</b>	200	<b>340</b>	<b>21,4</b>	8,2	<b>280</b>	<b>60</b>

**Site : Ferme André Labonté (St Isidore) 2016**

Fumier automne (kg N/ha)	Fumier printemps (kg N/ha)	Azote Démarreur (kg N/ha)	Total N appliquée avant V8 (kg N/ha)	INA moyen Stade V8	N appliqué en post-levée (kg N/ha)	Total N (kg N/ha)	Rendement (T/ha)	Taux de protéine brute (%)	N exporté (kg N/ha)	Bilan (kg N/ha)
0	0	13	13	<b>1,1</b>	0	<b>13</b>	<b>18,8</b>	6,2	<b>229</b>	<b>-216</b>
0	0	13	13	<b>1,1</b>	50	<b>63</b>	<b>17,7</b>	6,4	<b>198</b>	<b>-135</b>
0	0	13	13	<b>1,1</b>	100	<b>113</b>	<b>14,9</b>	7,4	<b>179</b>	<b>-66</b>
0	0	13	13	<b>1,1</b>	150	<b>163</b>	<b>16,7</b>	6,5	<b>190</b>	<b>-27</b>
0	0	13	13	<b>1,1</b>	200	<b>213</b>	<b>19,2</b>	7,0	<b>209</b>	<b>4</b>

Les résultats à St-Isidore (en bleu) sont présentés à titre indicatif seulement car un bris d'équipement a conduit à la perte des mesures de rendements de deux blocs et demi sur quatre.

### 2.2.3 Résultats en 2017

Tableau 22. Résultats du suivi du maïs ensilage, sur quatre sites en 2017.

Fumier automne (kg N/ha)	Fumier printemps (kg N/ha)	Azote Demarreur (kg N/ha)	Total N appliquée avant V8 (kg N/ha)	INA moyen Stade V8	N appliqué en post-levée (kg N/ha)	Total N (kg N/ha)	Rendement (T/ha)	Taux de protéine brute (%)	N exporté (kg N/ha)	Bilan (kg N/ha)
0	70	50	120	<b>0,9</b>	0	<b>120</b>	<b>10,3</b>	5,4	<b>89</b>	<b>31</b>
0	70	50	120	<b>0,9</b>	50	<b>170</b>	<b>15,4</b>	6,2	<b>154</b>	<b>16</b>
0	70	50	120	<b>0,9</b>	100	<b>220</b>	<b>13,2</b>	6,4	<b>137</b>	<b>83</b>
0	70	50	120	<b>0,9</b>	150	<b>270</b>	<b>16,6</b>	5,5	<b>145</b>	<b>125</b>
0	70	50	120	<b>0,9</b>	200	<b>320</b>	<b>16,3</b>	7,5	<b>198</b>	<b>122</b>
0	0	50	50	<b>1,0</b>	0	<b>50</b>	<b>15,3</b>	6,2	<b>100</b>	<b>-50</b>
0	0	50	50	<b>1,0</b>	50	<b>100</b>	<b>15,1</b>	7,3	<b>117</b>	<b>-17</b>
0	0	50	50	<b>1,0</b>	100	<b>150</b>	<b>15,8</b>	7,4	<b>124</b>	<b>26</b>
0	0	50	50	<b>1,0</b>	150	<b>200</b>	<b>13,9</b>	7,3	<b>108</b>	<b>92</b>
0	0	50	50	<b>1,0</b>	200	<b>250</b>	<b>13,8</b>	7,6	<b>112</b>	<b>138</b>
0	70	25	95	<b>0,9</b>	0	<b>95</b>	<b>18,3</b>	7,8	<b>76</b>	<b>19</b>
0	70	25	95	<b>0,9</b>	50	<b>145</b>	<b>13,2</b>	8,1	<b>57</b>	<b>88</b>
0	70	25	95	<b>0,9</b>	100	<b>195</b>	<b>9,9</b>	7,3	<b>39</b>	<b>156</b>
0	70	25	95	<b>0,9</b>	150	<b>245</b>	<b>11,7</b>	7,3	<b>45</b>	<b>200</b>
0	70	25	95	<b>0,9</b>	200	<b>295</b>	<b>9,6</b>	8,1	<b>41</b>	<b>254</b>
0	0	25	25	<b>1,0</b>	0	<b>25</b>	<b>12,9</b>	6,3	<b>130</b>	<b>-105</b>
0	0	25	25	<b>1,0</b>	50	<b>75</b>	<b>14,9</b>	6,9	<b>166</b>	<b>-91</b>
0	0	25	25	<b>1,0</b>	100	<b>125</b>	<b>19,3</b>	7,3	<b>226</b>	<b>-101</b>
0	0	25	25	<b>1,0</b>	150	<b>175</b>	<b>17,7</b>	8,0	<b>224</b>	<b>-49</b>
0	0	25	25	<b>1,0</b>	200	<b>225</b>	<b>17,6</b>	5,9	<b>162</b>	<b>63</b>

Sur le site du CRDS, les résultats (en bleu) sans fumier avec 50 unités d'azote au démarreur sont présentés à titre indicatif seulement car il n'y avait que deux répétitions sur trois à la récolte et ceux avec fumier et 25 unités d'azote n'avaient plus qu'une répétition sur trois à la récolte (pertes dû à l'accumulation d'eau au printemps).

Fumier automne (kg N/ha)	Fumier printemps (kg N/ha)	Azote Demarreur (kg N/ha)	Total N appliquée avant V8 (kg N/ha)	INA moyen Stade V8	N appliqué en post-levée (kg N/ha)	Total N (kg N/ha)	Rendement (T/ha)	Taux de protéine brute (%)	N exporté (kg N/ha)	Bilan (kg N/ha)
0	60	50	110	<b>0,6</b>	0	<b>110</b>	<b>9,8</b>	7,3	<b>112</b>	<b>-2</b>
0	60	50	110	<b>0,6</b>	50	<b>160</b>	<b>11,6</b>	7,0	<b>131</b>	<b>29</b>
0	60	50	110	<b>0,6</b>	100	<b>210</b>	<b>12,6</b>	7,2	<b>147</b>	<b>63</b>
0	60	50	110	<b>0,6</b>	150	<b>260</b>	<b>11,8</b>	6,9	<b>130</b>	<b>130</b>
0	60	50	110	<b>0,6</b>	200	<b>310</b>	<b>13,3</b>	6,5	<b>156</b>	<b>154</b>
0	0	50	50	<b>1,1</b>	0	<b>50</b>	<b>13,3</b>	6,1	<b>130</b>	<b>-80</b>
0	0	50	50	<b>1,1</b>	50	<b>100</b>	<b>16,2</b>	7,4	<b>194</b>	<b>-94</b>
0	0	50	50	<b>1,1</b>	100	<b>150</b>	<b>15,3</b>	7,7	<b>190</b>	<b>-40</b>
0	0	50	50	<b>1,1</b>	150	<b>200</b>	<b>16,5</b>	7,4	<b>194</b>	<b>6</b>
0	0	50	50	<b>1,1</b>	200	<b>250</b>	<b>15,8</b>	7,5	<b>191</b>	<b>59</b>
0	60	25	85	<b>0,5</b>	0	<b>85</b>	<b>7,2</b>	6,6	<b>75</b>	<b>10</b>
0	60	25	85	<b>0,5</b>	50	<b>135</b>	<b>7,8</b>	6,6	<b>83</b>	<b>52</b>
0	60	25	85	<b>0,5</b>	100	<b>185</b>	<b>9,0</b>	7,1	<b>102</b>	<b>83</b>
0	60	25	85	<b>0,5</b>	150	<b>235</b>	<b>10,0</b>	5,1	<b>82</b>	<b>153</b>
0	60	25	85	<b>0,5</b>	200	<b>285</b>	<b>8,8</b>	7,7	<b>107</b>	<b>178</b>
0	0	25	25	<b>0,8</b>	0	<b>25</b>	<b>9,2</b>	6,7	<b>98</b>	<b>-73</b>
0	0	25	25	<b>0,8</b>	50	<b>75</b>	<b>13,7</b>	6,9	<b>151</b>	<b>-76</b>
0	0	25	25	<b>0,8</b>	100	<b>125</b>	<b>13,1</b>	7,3	<b>153</b>	<b>-28</b>
0	0	25	25	<b>0,8</b>	150	<b>175</b>	<b>13,6</b>	7,3	<b>160</b>	<b>15</b>
0	0	25	25	<b>0,8</b>	200	<b>225</b>	<b>12,3</b>	7,6	<b>151</b>	<b>74</b>

**Site : St-Odilon 2017**

Fumier automne (kg N/ha)	Fumier printemps (kg N/ha)	Azote Demarreur (kg N/ha)	Total N appliquée avant V8 (kg N/ha)	INA moyen Stade V8	N appliqué en post-levée (kg N/ha)	Total N (kg N/ha)	Rendement (T/ha)	Taux de protéine brute (%)	N exporté (kg N/ha)	Bilan (kg N/ha)
0	0	50	50	<b>1,1</b>	0	<b>50</b>	<b>11,6</b>	6,1	<b>114</b>	<b>-64</b>
0	0	50	50	<b>1,1</b>	50	<b>100</b>	<b>12,8</b>	6,9	<b>143</b>	<b>-43</b>
0	0	50	50	<b>1,0</b>	100	<b>150</b>	<b>12,5</b>	6,7	<b>133</b>	<b>17</b>
0	0	50	50	<b>1,1</b>	150	<b>200</b>	<b>12,6</b>	7,6	<b>155</b>	<b>45</b>
0	0	50	50	<b>1,1</b>	200	<b>250</b>	<b>13,7</b>	8,5	<b>188</b>	<b>62</b>

**Site : St-Vallier 2017**

Fumier automne (kg N/ha)	Fumier printemps (kg N/ha)	Azote Demarreur (kg N/ha)	Total N appliquée avant V8 (kg N/ha)	INA moyen Stade V8	N appliqué en post-levée (kg N/ha)	Total N (kg N/ha)	Rendement (T/ha)	Taux de protéine brute (%)	N exporté (kg N/ha)	Bilan (kg N/ha)
30	0	50	80	<b>1,2</b>	0	<b>80</b>	<b>18,5</b>	7,1	<b>214</b>	<b>-134</b>
30	0	50	80	<b>1,3</b>	50	<b>130</b>	<b>18,2</b>	7,6	<b>220</b>	<b>-90</b>
30	0	50	80	<b>1,1</b>	100	<b>180</b>	<b>18,9</b>	7,3	<b>220</b>	<b>-40</b>
30	0	50	80	<b>1,2</b>	150	<b>230</b>	<b>18,5</b>	7,3	<b>218</b>	<b>12</b>
30	0	50	80	<b>1,3</b>	200	<b>280</b>	<b>18,5</b>	7,1	<b>209</b>	<b>71</b>

## 2.3. Analyse des résultats

### 2.3.1 Analyse des rendements

En 2015, le rendement a augmenté de manière significative avec les apports et ce même si l'INA au site Tremco était de 1,0 ou 1,1. Par contre, en 2016 et 2017, quels que soient les sites, il n'y a pas eu de différence significative entre les traitements sans engrais et avec engrais en post-levée. Même un site comme St-Odilon en 2017 qui n'a pas reçu de fumier et était sur un retour de maïs ensilage n'a pas présenté d'augmentation de rendement avec l'apport d'azote en post-levée (apport au démarreur : 50 kg N/ha)(Figure 31 et Tableau 22). Les rendements de ce site sont aussi bons que ceux des autres sites (12 TM.S. / ha). Il s'agit d'un site sur sol de type loam graveleux avec un taux de matière organique élevé (7,5 %) et avec un historique de prairie avant deux années de suite en maïs ensilage. Ces résultats concordent avec ceux présentés en 2014 par Gasser et coll. Les essais réalisés dans le cadre de cette étude ont été dans des conditions similaires. Plusieurs sites étaient sur un retour de prairie ou de légumineuses et plusieurs sites avaient des apports de fumiers ou de lisiers à l'automne ou au printemps. Les conditions typiques des fermes laitières du Québec entre autre (Tableau 23). Ainsi dans ces conditions, l'apport d'azote au démarreur (combiné à l'azote des fumiers et du sol) semble avoir été suffisant pour combler les besoins du maïs jusqu'à la récolte.

**Tableau 23. Résumé des conditions des sites à l'essai dans le maïs**

Année	Site	Fumier	Précédent cultural
2015	CRDS	Printemps	Prairie trèfle (2 ans)
2015	Tremco	Printemps	Soya
2016	CRDS	Automne	Blé d'automne
2016	Laliberté	Automne	Prairie de graminées
2016	St-Narcisse	Automne	Maïs ensilage
2016	St-Isidore	Aucun	Maïs ensilage
2017	CRDS	Printemps et sans	Soya
2017	Tremco	Printemps et sans	Prairie de graminées
2017	St-Odilon	Aucun	Maïs ensilage
2017	St-Vallier	Automne	Prairie de graminées

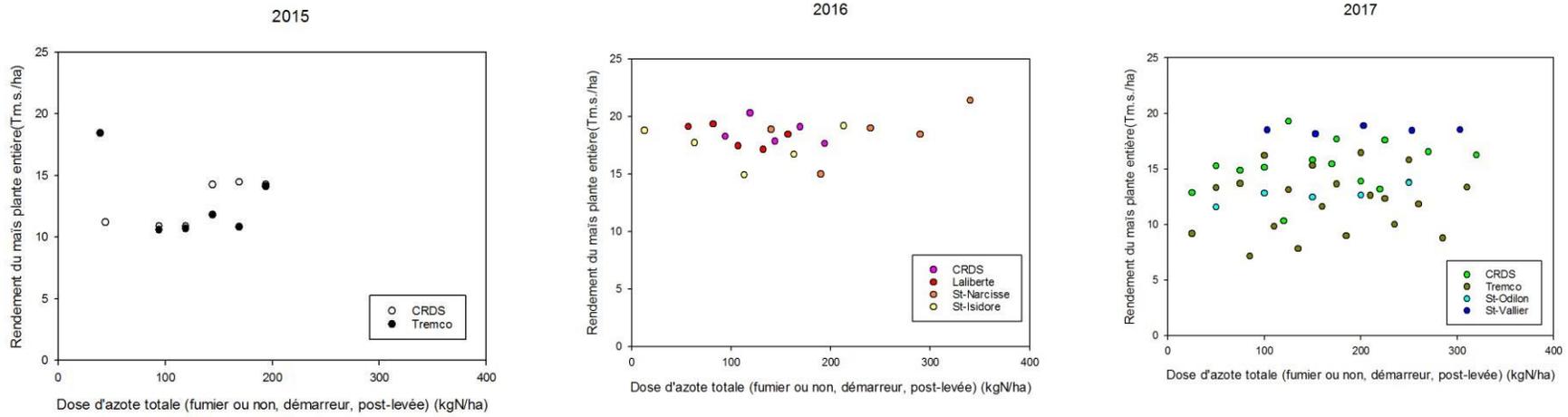


Figure 31. Rendement en maïs, plante entière (kg M.S. /ha)

## 2.3.2 Analyse du contenu en protéine brute et exportation d'azote par la récolte

### 2.3.2.1 Contenu en protéine brute

Le contenu en protéine brute du maïs en plante entière est demeuré constant quel que soit le niveau de fertilisation, soit entre 5 et 8,5 %. L'augmentation de la fertilisation n'a donc pas eu d'effet.

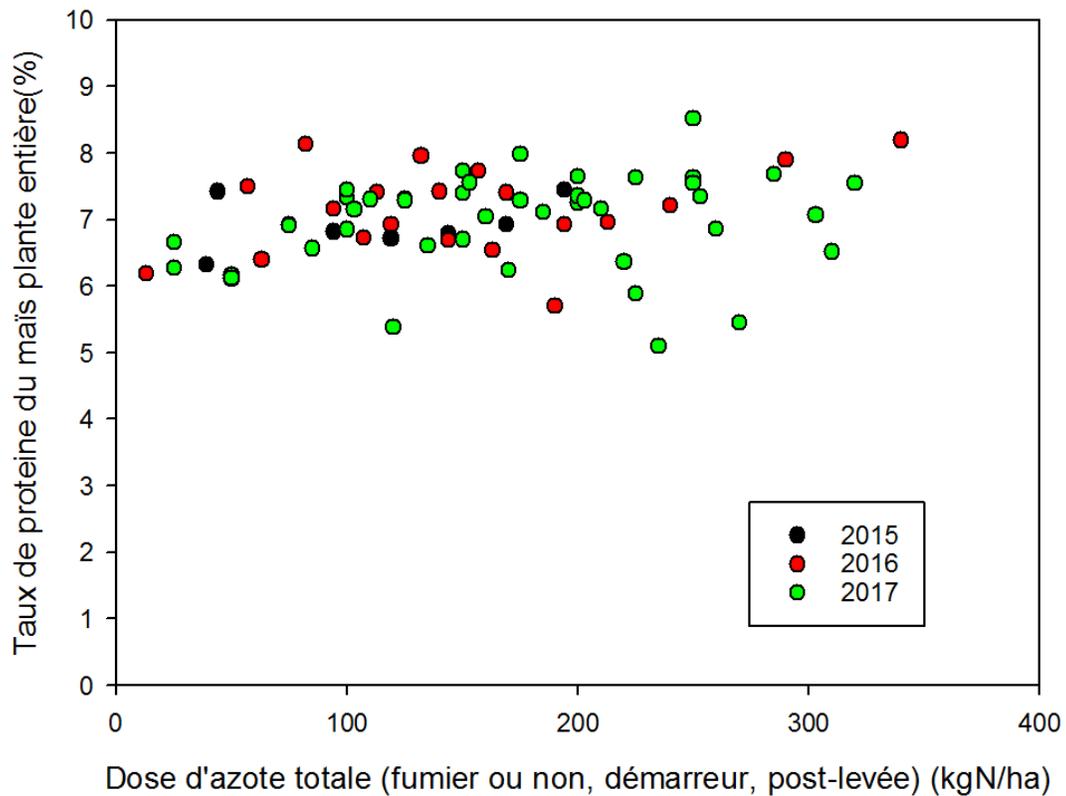


Figure 32. Contenu en protéine brute du maïs plante entière à la récolte (%)

### 2.3.2.2 Prélèvement d'azote par la récolte

Au Québec, la recommandation de fertilisation du maïs-ensilage est de 120-170 kg N/ha, dont 30-50 kg N/ha en bande au semis (Guide de référence en fertilisation 2010). Habituellement, les producteurs appliquent du fumier au printemps, puis un démarreur en bande au semis et un engrais azoté en post-levée du maïs avant le stade V6-V8.

L'application de 30-50 kg N/ha au démarreur avec ou sans déjections animales au printemps ont été plus que suffisants pour combler les prélèvements d'azote à ce stade. Ce qui explique l'obtention d'un INA de 1.

En effet, en 2015, la quantité d'azote exportée au stade V6 était inférieure à 2,8 kg N/ha. En 2016 et 2017, au stade V8, l'exportation était entre 10 et 35 kg N/ha (l'exportation de 54 kg N/ha correspond à des parcelles qui n'avaient pas reçu de fumier et situé au sommet d'une pente lors du printemps pluvieux et froid de 2017) (Figure 33) et ce peu importe la dose d'azote appliquée préalablement et l'année. Il est donc normal d'avoir mesuré un INA près de 1 à ce stade. Les exportations d'azote à partir du stade V8 sont beaucoup plus élevées qu'au stade V6C'est pour cette raison qu'il aurait été préférable de retarder la mesure de l'INA.

L'azote total exporté (prélevé lors de la récolte et sorti du champ) est important et variable (Figure 34). Cette exportation d'azote n'est pas significativement influencée par le niveau de fertilisation azotée. Le niveau d'azote recommandé dans le Guide de référence en fertilisation (120-170 unités) ne comble pas toujours l'azote exporté. Néanmoins, dans un contexte de rotation avec des légumineuses ou des prairies et d'utilisation de fumier, cela n'a pas d'influence sur le rendement, ni sur le taux de protéine brute de la récolte de la plante entière.

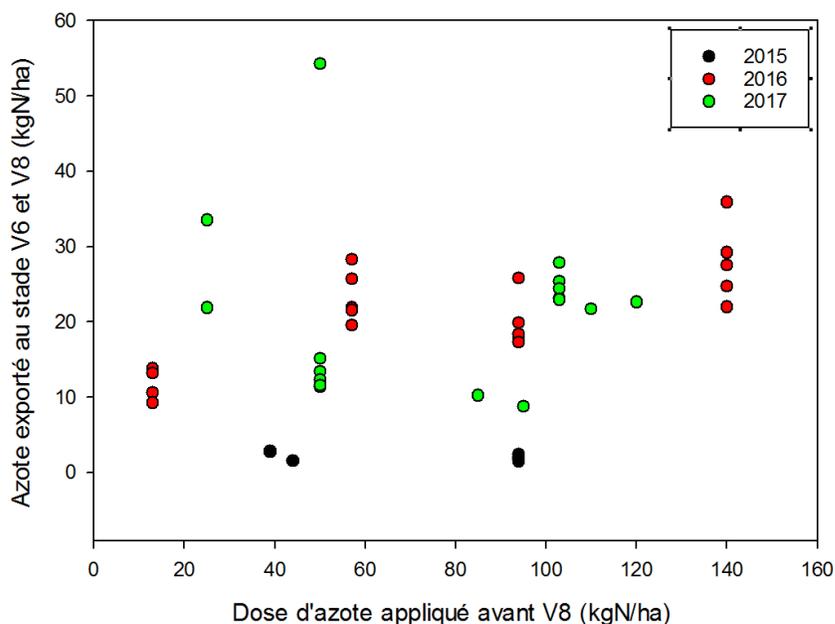


Figure 33. Prélèvement d'azote au stade V6 (2015) et V8 (2016-2017) en kg N/ha (moyenne de chaque traitement sur chaque site)

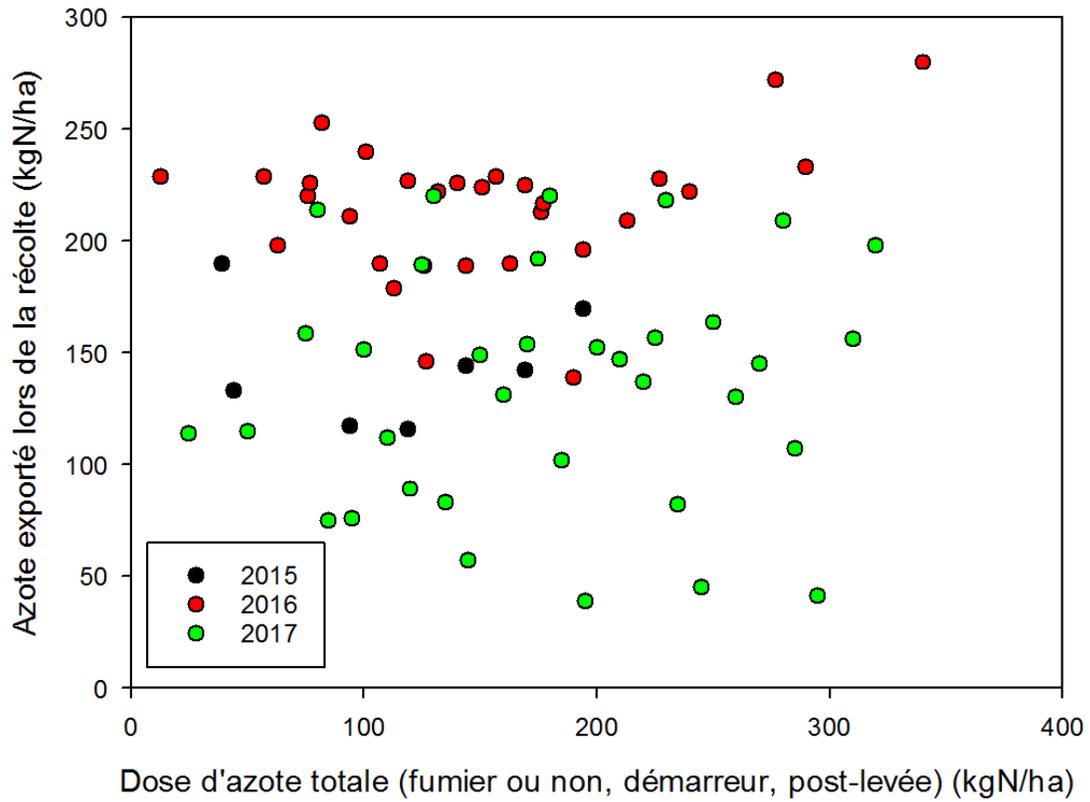


Figure 34. Prélèvement d'azote à la récolte en kg N/ha (moyenne de chaque traitement sur chaque site)

### 2.3.3 Bilan azoté et impact environnemental

Les figures Figure 35 et Figure 36 présentent les résultats des calculs du bilan azoté (apports totaux d'azote moins azote exporté lors de la récolte). Lorsque la fertilisation azotée dépasse 200 kg N/ha, le bilan devient systématiquement positif, il y aurait donc possiblement des pertes importants d'azote dans l'environnement.

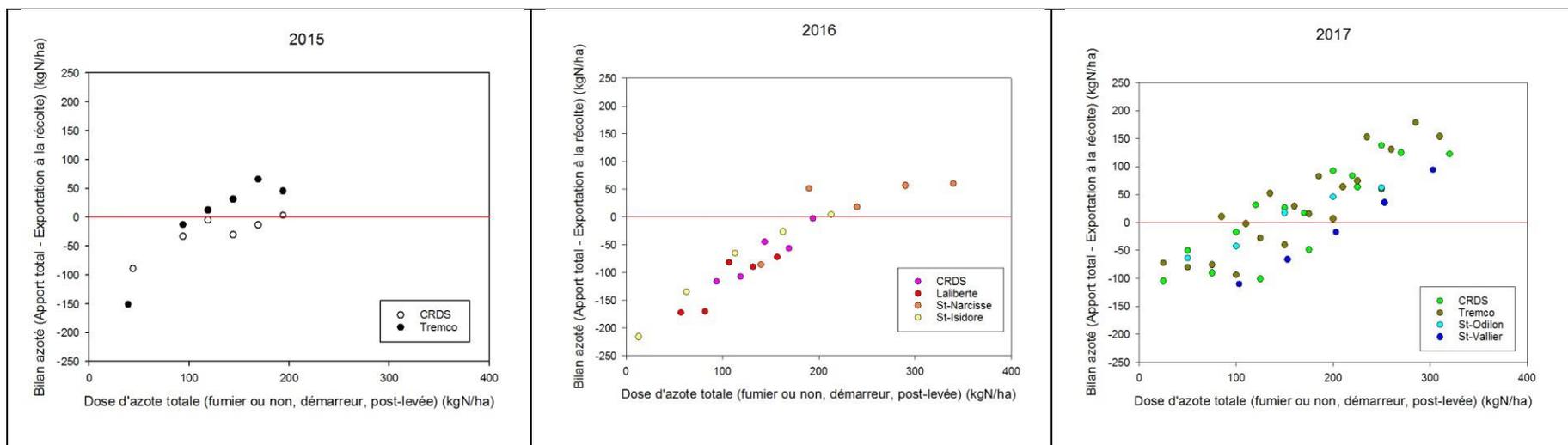


Figure 35. Bilan azoté à la récolte du maïs plante entière sur chaque site à chaque année en kg N/ha

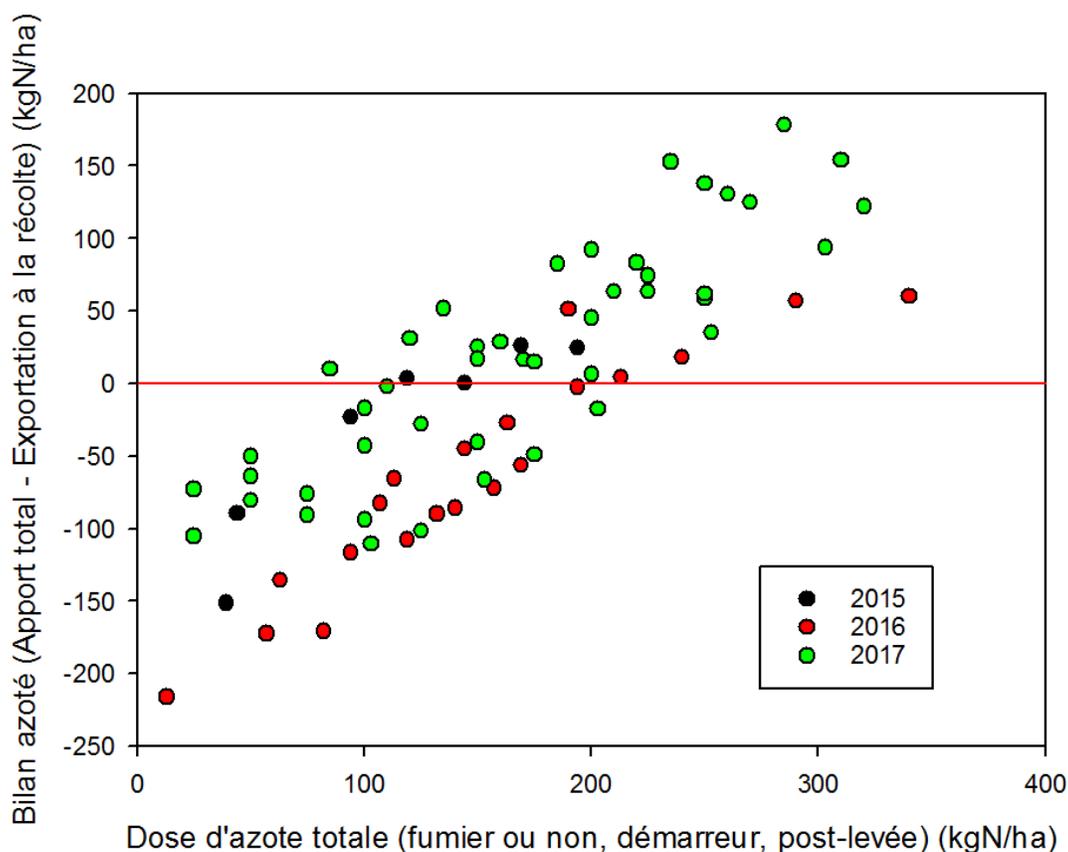


Figure 36. **Bilan azoté à la récolte du maïs plante entière sur 3 ans en kg N/ha**

### 2.3.4 Impact sur les gaz à effet de serre

Pour vérifier l'impact sur les gaz à effet de serre de l'utilisation de l'azote dans le maïs des scénarios des références ont été établis en utilisant l'outil d'évaluation et de réduction des émissions de gaz à effet de serre des fermes agricoles : le logiciel HOLOS d'Agriculture et Agro-Alimentaire Canada, version 3.0.3 de septembre 2017.

Les scénarios de références ont été établis pour une seule zone agricole, l'écodistrict 483 dont le point central est situé à proximité de Sherbrooke (Figure 23).

La texture du sol retenue, est une texture moyenne, le travail du sol intensif ou réduit selon le scénario. Tous les autres paramètres, ont été établis par défaut par le logiciel HOLOS (voir Figure 24). Pour les scénarios de référence, seule la culture analysée a été scénarisée. Ainsi, dans les scénarios, il n'y a que le maïs-ensilage d'inscrite et rien d'autre (pas d'autre culture et pas d'animaux).

### 2.3.4.1 Scénario 1. Référence pour du maïs cultivé sur 100 ha avec un apport de 160 kg N/ha d'azote

Le rendement retenu est de 15 T/ha de M.S. (100 %) et la superficie de 100 ha. Le travail du sol était intensif et ensuite réduit (deux simulations). La fertilisation azotée appliquée a été de 160 kg N/ha (recommandation généralement retenue par les conseillers agricoles) et la fertilisation phosphatée de 40 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. La teneur en azote des tissus aériens et souterrain est celle provenant d'HOLOS, soit 0,0130 et 0,0070 respectivement. Les autres paramètres ont été ceux fournis par défaut par HOLOS (Tableau 24).

**Tableau 24. Caractéristique du maïs pour le scénario de référence avec 160 kg N/ha d'azote.**

Source : HOLOS, version 3.0.3 Septembre 2017.

Ferme Cultures Bovins Produits laitiers Porc Mouton Volaille Autres animaux														
Détails <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non														
Fourrage annuel, légumineuses, céréales, oléagineux, cultures spéciales														
Type	Superficie annuelle (ha)	Rendement (kg ha <sup>-1</sup> )	Irrigué	Herbicide	Taux de fertilisation azotée (kg N/ha)	Taux de fertilisation au phosphore (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Teneur en eau (w/w)	Teneur en azote des résidus aériens	Teneur en N des résidus souterrains (kg)	Rapport de rendement	Rapport des résidus aériens	Rapport des résidus souterrains	Energie en carburant (GJ ha <sup>-1</sup> )	Energie pour l'herbicide (GJ ha <sup>-1</sup> )
Mais fourrager	100,0	15000,0	Non	Oui	160	40	0,00	0,0130	0,0070	0,72	0,08	0,20	3,29	0,08
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00

### 2.3.4.2 Scénario 2. Référence pour du maïs cultivé sur 100 ha avec un apport de 80 kg N/ha d'azote

Le rendement retenu est de 15 T/ha de M.S. (100 %) et la superficie de 100 ha. Le travail du sol était intensif et ensuite réduit (deux simulations). La fertilisation azotée appliquée a été de 80 kg N/ha. Elle représente l'apport provenant du fumier et du démarreur. Avec un apport semblable nous n'avons pas eu d'augmentation de rendement avec un ajout d'azote en post-levée du maïs. La fertilisation phosphatée était de 40 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. La teneur en azote des tissus aériens et souterrain est celle provenant d'HOLOS, soit 0,0130 et 0,0070 respectivement. Les autres paramètres ont été ceux fournis par défaut par HOLOS (Tableau 25).

**Tableau 25. Caractéristique du maïs pour le scénario de référence avec 80 kg N/ha d'azote.**

Source: HOLOS, version 3.0.3 Septembre 2017.

Ferme Cultures Bovins Produits laitiers Porc Mouton Volaille Autres animaux														
Détails <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non														
Fourrage annuel, légumineuses, céréales, oléagineux, cultures spéciales														
Type	Superficie annuelle (ha)	Rendement (kg ha <sup>-1</sup> )	Irrigué	Herbicide	Taux de fertilisation azotée (kg N/ha)	Taux de fertilisation au phosphore (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Teneur en eau (w/w)	Teneur en azote des résidus aériens	Teneur en N des résidus souterrains (kg)	Rapport de rendement	Rapport des résidus aériens	Rapport des résidus souterrains	Energie en carburant (GJ ha <sup>-1</sup> )	Energie pour l'herbicide (GJ ha <sup>-1</sup> )
Maïs fourrager	100,0	15000,0	Non	Oui	80	40	0,00	0,0130	0,0070	0,72	0,08	0,20	3,29	0,08
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00
Aucun	0,0	0,0	Non	Oui	0	0	0,00	0,0000	0,0000	0,34	0,43	0,23	0,00	0,00

### 2.3.4.3 Comparaison de la production des gaz à effet de serre selon les scénarios

Les résultats de production des gaz à effet de serre des scénarios précédents sont présentés au **Tableau 26**. Une diminution de moitié de la fertilisation azotée sans diminution du rendement (sur une même superficie de 100 ha) correspond à une diminution importante de la production de gaz à effet de serre (de 220 T/an à 140 T/an), quel que soit le type de travail de sol. La réduction de la fertilisation azotée a également plus d'impact sur la réduction des gaz à effet de serre que le changement de travail de sol.

Selon les scénarios de 51 % (travail intensif) à 59 % (travail réduit) des gaz à effet de serre émis (CO<sub>2</sub> équivalent) proviennent de la production directe de N<sub>2</sub>O. Le reste des gaz à effet de serre émis proviennent des apports indirects de N<sub>2</sub>O (11 %) et de l'utilisation d'énergie pour la production des engrais azotés et phosphatés de 30 % (travail réduit) à 39 % (travail intensif). La réduction de la fertilisation azotée dans le maïs aurait donc un impact réel sur la production de gaz à effet de serre.

**Tableau 26. Résumé des émissions en équivalent CO<sub>2</sub> pour du maïs cultivé sur 100 ha selon différents types de travail de sol et différents niveaux d'azote.**

Source: HOLOS, version 3.0.3 Septembre 2017.

Type de travail de sol	Fertilisation azotée kg/ha	Direct N <sub>2</sub> O (CO <sub>2</sub> e) T/an	Indirect N <sub>2</sub> O (CO <sub>2</sub> e) T/an	Energy CO <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> e) T/an	Production de CO <sub>2</sub> T/an
Intensif	160	114 51 %	25 11 %	83 37 %	<b>222</b>
	80	71 51 %	15 11 %	54 39 %	<b>140</b>
Réduit	160	128 59%	25 11%	65 30%	<b>218</b>
	80	79 56 %	15 11 %	47 33 %	<b>141</b>

### 2.3.5 Indice de nutrition azoté

L'indice de nutrition azoté est calculé en comparant la teneur en azote du maïs au moment du prélèvement avec la teneur en azote critique (Nc) calculée en fonction de la biomasse. La recommandation pour la mesure de l'INA dans le maïs est de prélever les plants lorsque le maïs atteint le stade V12, de manière à avoir un niveau de biomasse suffisant. Dans ce projet, nous avons prélevé les échantillons beaucoup plus tôt de manière à vérifier s'il était possible d'ajuster la fertilisation en post-levée en fonction des résultats obtenus avec l'INA. Ceci afin de permettre aux agriculteurs d'avoir une fenêtre raisonnable pour appliquer l'azote en post-levée dans le maïs avec les équipements traditionnels.

Au stade V6-V8, la courbe établie par Ziadi et coll. 2008 n'est pas utilisable car le niveau de biomasse est trop faible (inférieure à 1 T M.S./ha) (Figure 37. Concentration critique en azote en fonction de la biomasse). Aussi une valeur constante de Nc = 35 a été retenue. Elle représente la teneur en azote pour une inférieure à de 1 T M.S./ha. Car le calcul de la teneur en azote critique est de :  $Nc = 34,0 \times MS^{-0,37}$  où 34 est à la concentration critique en azote exprimée en

kg-1 MS (ou 3,4 %) pour une biomasse en matière sèche accumulée de 1 T/ha (Ziadi et al., 2008) et 0,37 est le coefficient de dilution.

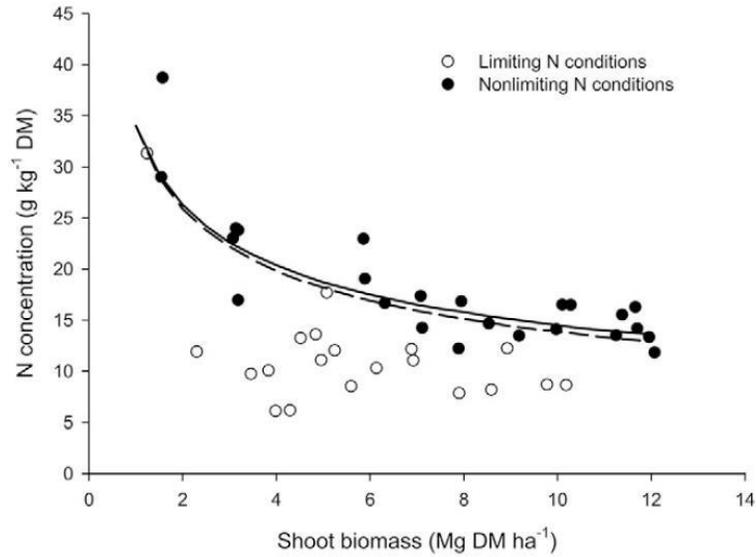


Figure 37. Concentration critique en azote en fonction de la biomasse. Source Ziadi et coll. 2008

Les résultats du rendement obtenu selon les valeurs de l'INA mesurées au stade V6-V8 sont présentés à la Figure 38. À ce stade les valeurs d'INA mesurés se situaient en majorité entre 0,8 et 1,2, donc entre satisfaisant et excédentaire (Figure 40) et ce même pour de très faible apport d'azote (13 kg N/ha). Les apports d'azote à ce stade variaient de 13 à 140 unités d'azote.

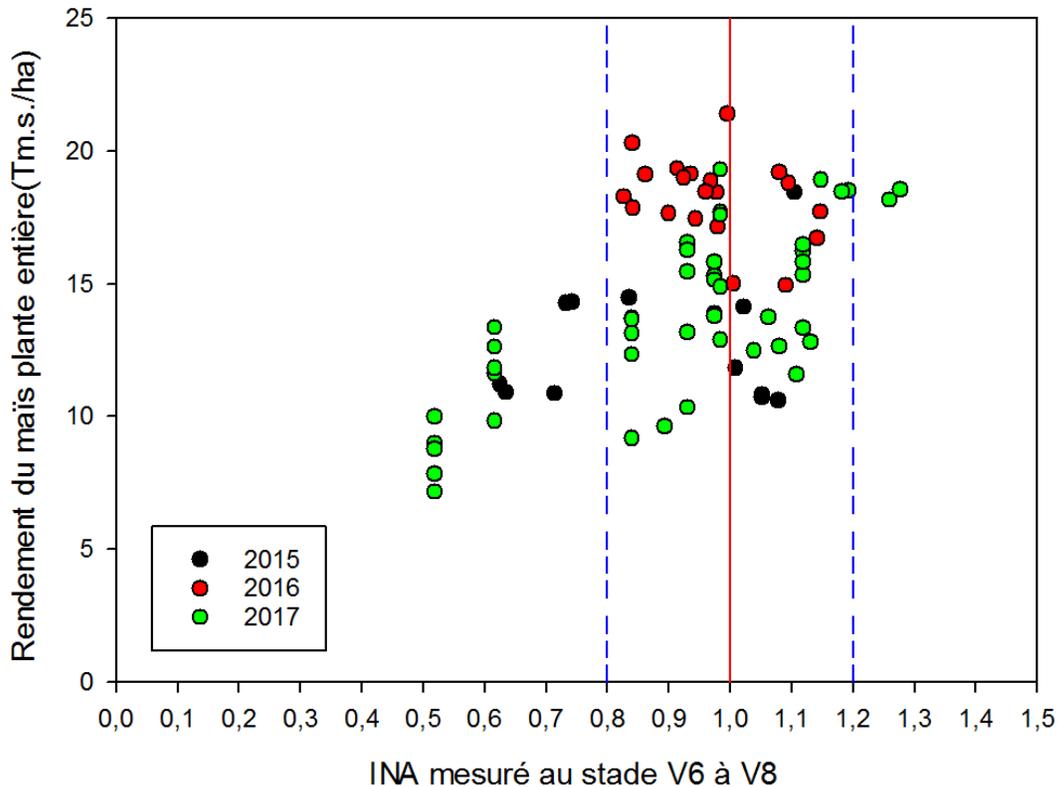


Figure 38. **Rendement du maïs plante entière en fonction de l'INA mesuré au stade V6 à V8**

En 2015 nous avons eu une augmentation significative des rendements avec l'ajout d'azote et ce même pour le site Tremco où l'on mesurait un INA d'environ 1,0.

En 2016, il n'y a pas eu d'augmentation significative du rendement avec l'ajout d'azote en post-levé du maïs. Il n'est donc pas surprenant de constater que la valeur de l'INA se trouve entre 0,8 et 1,0.

En 2017, des traitements ont été ajoutés afin d'évaluer la possibilité d'obtenir différentes valeurs d'INA dans le maïs au stade V8. Il a été possible d'obtenir différentes valeurs d'INA au site Tremblay seulement (Figure 39). Par contre, les parcelles avec et sans fumier ne doivent pas être comparé. À cause du positionnement des deux essais. Donc les valeurs les plus faibles d'INA ont été obtenues dans les parcelles ayant été le plus fertilisées, elles ont reçu du lisier de vache au printemps (avec 25 ou 50 kg N/ha au démarreur). Celles-ci étaient au bas d'une pente (humide). Ce ne serait donc pas le niveau de fertilisation azotée qui aurait influencé la concentration d'azote présente dans les plants au stade V6-V8 mais bien plutôt la capacité du maïs à prélever de l'azote et donc les conditions du sol.

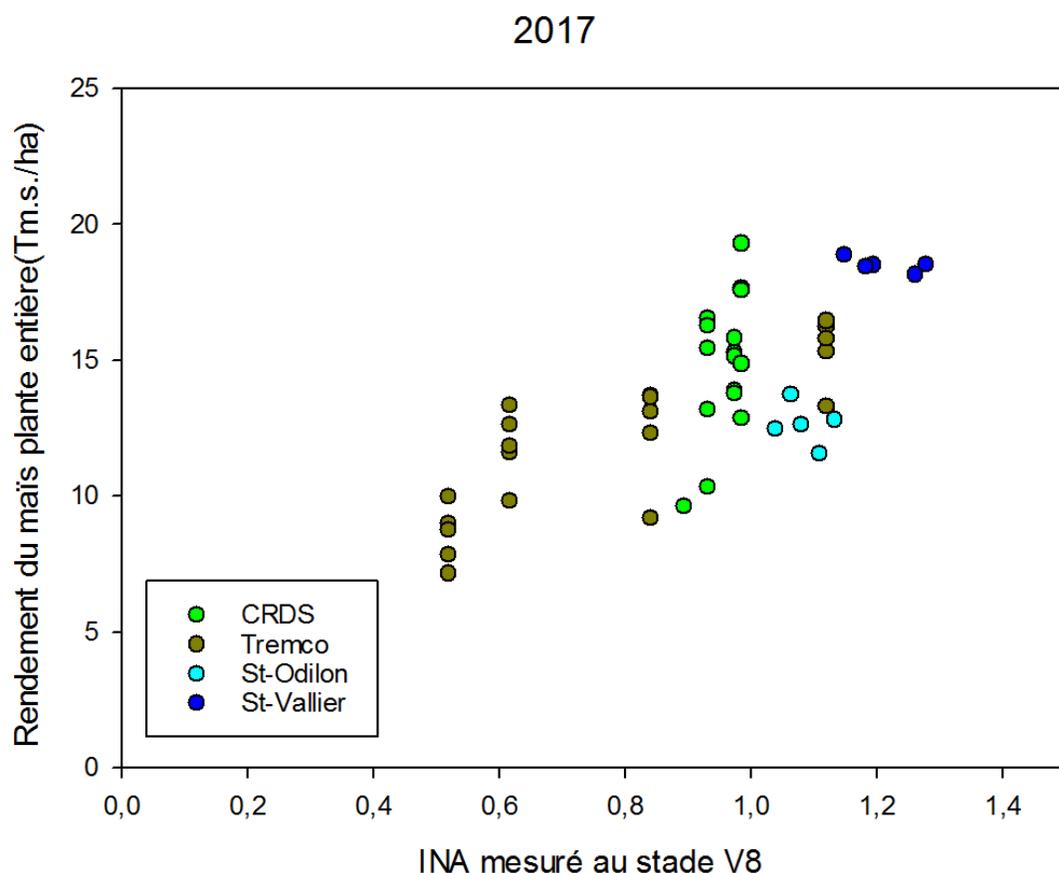


Figure 39. **Rendement du maïs plante entière en fonction de l'INA mesuré au stade V6 à V8 en 2017**

La mesure de l'INA au stade V6-V8 ne permet pas d'évaluer le besoin en azote futur. À ce stade de maïs a de très faible besoin et même avec un apport très faible de fertilisant nous obtenons un INA de près de 1. Les besoins du maïs augmentent de façon exponentielle à partir du stade V6. Pour être en mesure d'ajuster les recommandations azotées, il faudrait retarder la mesure de l'INA. Les recommandations des chercheurs d'attendre le stade V12 pour mesurer l'INA semblent se confirmer. Aussi, si on veut utiliser l'INA pour déterminer les besoins d'azote en post-levée, il faudra aussi évaluer la possibilité de retarder l'application (hauteur maximum du maïs afin de ne pas l'écraser, possibilité d'adapter les équipements pour passer à un stade plus avancé).

L'INA peut également être utilisé a posteriori pour estimer si la fertilisation azoté était suffisante. Un suivi sur quelques années permettrait de prendre en compte les variations climatiques. Cet outil pourrait nous permettre de sensibiliser les producteurs agricoles. Par exemple, nous pourrions confirmer qu'un producteur surfertilise son maïs s'il obtient des INA supérieurs à 1 et ce sur plusieurs années. Nous pourrions aussi nous en servir pour le sensibiliser sur l'impact d'une surfertilisation sur la production de gaz à effet de serre. Par contre, il ne serait pas possible de lui recommander une quantité d'azote précise afin d'ajuster les apports.

Dans tous les cas, l'ajout d'azote ne sera pas nécessairement la solution. Il faudra analyser dans quelles conditions les plants avec un faible INA se trouvaient. Par exemple, la teneur en azote pourrait être faible dans des sols mal drainés (asphyxie des racines). La solution ne sera donc pas d'ajouter de l'azote, mais d'améliorer le drainage.

<b>Interprétation des valeurs de l'INA</b>	
<b>1.2</b>	<b>Excédentaire</b>
<b>1.0</b>	<b>Très satisfaisant</b>
<b>0.8</b>	<b>Satisfaisant</b>
<b>0.6</b>	<b>Insuffisant</b>
<b>0.4</b>	<b>Très insuffisant</b>

(Source : document de vulgarisation français)

Figure 40. Interprétation des valeurs de l'INA

## 2.4. Conclusion

Hormis en 2015, il n'y a pas eu de différence significative du rendement du maïs et de son contenu en azote entre les traitements sans engrais et avec engrais en post-levée. Ces résultats concordent avec ceux présentés en 2014 par Gasser et coll. Ainsi dans des champs sur retour de prairie ou de légumineuses ou avec des apports de fumiers ou de lisiers à l'automne ou au printemps, l'apport d'azote au démarreur semble amplement suffisant. À cause de la faible réponse du maïs à l'azote, à ce stade, il a été impossible d'utiliser les indices de nutrition azotés pour mesurer l'azote à apporter au maïs en post-levée. Par contre, la mesure de l'INA au stade V12 peut servir à sensibiliser les producteurs sur l'état nutritionnel de leur maïs.

Lorsque la fertilisation azotée dépasse 200 kg N/ha, le bilan devient systématiquement positif, il y aurait donc possiblement des pertes importantes d'azote dans l'environnement.

En ce qui concerne la production de gaz à effet de serre, une diminution de moitié de la fertilisation azotée sans diminution du rendement correspond à une diminution importante de la production de gaz à effet de serre (de 220 T/an à 140 T/an pour une superficie de 100 ha), quel que soit le type de travail de sol. La réduction de la fertilisation azotée a également plus d'impact sur la réduction des gaz à effet de serre que le changement de travail de sol.

Les recommandations des chercheurs d'attendre le stade V12 pour mesurer l'INA semblent se confirmer. Aussi, pour utiliser l'INA pour déterminer les besoins d'azote en post-levée, il faudra

évaluer la possibilité de retarder l'application d'azote en post-levée en adaptant possible les équipements pour passer à un stade plus avancé. De nouveaux travaux de recherche seront toutefois nécessaires. L'INA peut également être utilisé à posteriori pour estimer si la fertilisation azoté était suffisante. Un suivi sur quelques années permettrait de prendre en compte les variations climatiques.

Dans tous les cas, l'ajout d'azote ne sera pas nécessairement la solution. Il faudra analyser dans quelles conditions les plants avec un faible INA se trouvaient. Par exemple, la teneur en azote pourrait être faible dans des sols mal drainés (asphyxie des racines). La solution ne sera donc pas alors d'ajouter de l'azote, mais d'améliorer le drainage.

### 3. Activité de diffusion

---

Le projet a été présenté aux participants de la tournée Plante Fourragère 2016, aux conseillers de du club Agroenvironnemental de l'Estrie (environ 15), au congrès de l'OAQ (environ 100 agronomes), à l'Expo San-T-Sol (environ 250 producteurs et intervenants), lors de la journée porte ouvert d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, à la journée Agropur (environ 80 participants) et à la journée conservation des ressources. Le rapport sera mis en ligne (Réseau Agriconsseil).

## Références

- Bélanger, G. et Richards, J. E. 1997. *Growth analysis of timothy grown with varying N nutrition*. Can. J. Plant Sci. 77: 373–380.
- Bélanger, G. et Richards, J. E. 1999. *Relationship between P and N concentrations in timothy*. Can. J. Plant Sci. 79: 65–70.
- Bélanger G. et Ziadi N. 2008. *Phosphorus and nitrogen relationships during spring Growth of an aging timothy sward*. Agron. J. 100: 1757 – 1762.
- Bélanger, G., Claessens, A., et Ziadi. N. 2012 . *Grain N and P relationships in maize*. Field Crop Res. 126 : 1–7.
- Brassard M. 2007. *Développement d'outils diagnostiques de la nutrition azotée du maïs-grain pour une gestion optimale de l'engrais azoté*. Mémoire présenté à la faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en Sols et environnement pour l'obtention du grade de maître es sciences (M. Se.). 106 p.
- Cantin, J. 2007. *Les tests de nitrate de sol afin d'ajuster la fertilisation azotée du maïs*. Colloque sur l'azote. Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec et Ordre des agronomes du Québec. 28 mars. Drummondville. P. 37-60.
- CRAAQ. 2005. *Les plantes fourragères*. Éditeurs scientifiques. Gilles Bélanger D.Sc. chercheur, Agriculture et Agroalimentaire Canada; Luc Couture Ph.D. chercheur, Agriculture et Agroalimentaire Canada; Gaëtan Tremblay Ph.D. chercheur, Agriculture et Agroalimentaire Canada. 209p.
- CRAAQ. 2010. Guide de référence en fertilisation. 2e édition actualisée. Éditeurs scientifiques. Léon-Étienne Parent, Ph.D., agronome, Université Laval. Gilles Gagné, M.Sc., agronome, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA).
- CRAAQ. 2017 *Fertilisants et amendements — Prix (AGDEX 540/855)*, 1 page.
- CRAAQ 2018. Foin – Analyse comparative provinciale 2016 – Analyse de données Agritel (AGDEX 120/891). 2 pages.
- Cruz, P., Jouany, C., Theau, J.-P., Petibon, P., Lecloux, E. et Duru, M. 2006. *L'utilisation de l'indice de nutrition azotée en prairies naturelles avec présence de légumineuses*. Fourrages 187 : 369-376.
- Debertin, D.L. 1986. *Agricultural Production Economics*. Macmillan Publishing Company, 366 pages
- Gagnon B, Ziadi N, Bélanger G, Tremblay, G., Parent G. 2017. *Engrais à libération contrôlée : effets sur le rendement et la valeur nutritive des graminées fourragère*. Journée d'information scientifique Bovins laitiers et Plantes fourragères Drummondville, QC 28 février 2017. Présentation.

Gasser M.A., Perron M.H., Martel S., Dufour C., Robert L. 2014. *Maïs sur retour de prairie : réduire la fertilisation azotée et les émissions de gaz à effet de serre*. 4p.

[https://www.irda.gc.ca/assets/documents/Publications/documents/gasser-et-al-2014\\_fiche\\_n\\_mais\\_retour\\_prairie.pdf](https://www.irda.gc.ca/assets/documents/Publications/documents/gasser-et-al-2014_fiche_n_mais_retour_prairie.pdf)

Gendron, L., communication personnelle, 9 mai 2018

Hall, M. H., Beegle, D. B., Bowersox, R. S. et Stout R. C. 2003. *Optimum nitrogen fertilization of cool-season grasses in the Northeast USA*. Agron. J. 95 : 1023–1027.

Khiari L. 2014. *Échantillonnage conventionnel des sols agricoles au Québec*. Guide technique. 21p.

Lemaire, G. et Salette, J. 1984. *Relationship between growth and nitrogen uptake in a pure grass stand: I. Environmental effects*. Agronomie 4 : 423–430.

Little Shannan, Lindeman Julia, Maclean Ken, Janzen Henry. 2008 Holos *Un outil pour estimer et réduire les GES émis par les fermes Méthodologie et algorithmes pour la version 1.1.x*, 187p

OMAFRA. 2017. *Agronomy guide for field crops*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Toronto, ON. Pub. 811. <http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/pub811/p811toc.html>

Thélier-Huché L., Farriggia A., Castillon P., 1999. *L'analyse d'herbe : un outil pour le pilotage de la fertilisation phosphotée et potassique des prairies naturelles et temporaires*. Institut de l'élevage. ITCF. INRA. ACTA. Chambres d'agriculture. COMIFER. 36p.

Valacta, 2017 : *Guide sur l'interprétation des analyses d'ensilages*.

En ligne : [http://www.valacta.com/FR/Nos-publications/Documents/guide-ensilages\\_FINAL\\_LIENS1.pdf](http://www.valacta.com/FR/Nos-publications/Documents/guide-ensilages_FINAL_LIENS1.pdf)

Woodbury Kuvik Patricia *High Protein Level in Hay - an Indicator of High Nitrates?*

<http://www.desertequinebalance.com/articles/high-protein-indicator-of-high-nitrate>

Ziadi, N., Brassard, M., Bélanger, G., Cambouris, A. N., Tremblay, N., Nolin, M. C. et Claessens. A. 2007 *Relationship between P and N concentrations in corn*. Agron. J. 99: 833-841.

Ziadi, N., Brassard, M., Bélanger, G., Cambouris, A. N., Tremblay, N., Nolin, M. C, Claessens, A. et Parent, L. E. 2008. *Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for corn in Eastern Canada*. Agron. J. 100: 271-276.

Ziadi N., Bélanger G. et Claessens, A. 2009. *Leaf Nitrogen concentration as an indicator of corn nitrogen status*. Agron. J. 101: 947-957.

Ziadi, N., Bélanger, G., et Claessens, A. 2012. *Relationship between soil nitrate accumulation and in-season corn N nutrition indicators*. Can. J. Plant Sci. 92: 331-339.

## Annexe 1 Description des sites en prairies

### 2015 : Champ C2-4

**Localisation :** Centre de recherche de Sherbrooke; Sherbrooke

**Rotation :** Champ implanté en 2012 avec du Trèfle rouge et de la Fléole des prés

2011	2012	2013	2014	2015
Orge	Trèfle rouge — Fléole des prés	Trèfle rouge — Fléole des prés	Trèfle rouge — Fléole des prés	Fléole des prés

#### Analyse de sol :

Date : Novembre 2015

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
6,0	7,0	7,0	167,0	128,0	4,5

**Texture du sol :** Loam argileux (Matériaux lacustres, Série : Lennoxville)

**Topographie :** Plane

**Fumier à l'automne :** Aucun

**Fumier au printemps :** Aucun

#### Taux de phosphore et de potasse

**appliqué : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> :** 20 kg/ha

**K<sub>2</sub>O :** 100 kg/ha

**Recommandation en azote selon guide CRAAQ :** 160 kg/ha (maximum)

Printemps : 64 kg/ha

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 48 kg/ha

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 48 kg/ha

#### Dates d'application des

**fertilisants :** Printemps : 05-mai-

15 Après 1<sup>ère</sup>

coupe : 11-juin-15

Après 2<sup>ème</sup>

coupe : 24-août-15

#### Dates des récoltes des parcelles

1<sup>ère</sup> coupe : 03— juin-15

2<sup>ème</sup> coupe : 22— juil-15

3<sup>ème</sup> coupe : 01— oct-15

#### Dates de fauche ou de nettoyage des parcelles par le producteur

07 — juin-15

19-août-15

Aucune

## 2015 : Champ 15

Localisation : Ferme TREMCO (Val-Joli)

Rotation : Champ implanté en 2011

2011	2012	2013	2014	2015
Avoinegrainée	40-60 % leg	Graminées	Graminées	Graminées

### Analyse de sol :

Date :

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
5,6	6,5	7,0	283	115	4,4

Texture du sol : Loam

Topographie : Planec

Fumier à l'automne : Aucun

Fumier au printemps : Aucun

### Taux de phosphore et de potasse appliqué :

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 28 kg/ha

K<sub>2</sub>O : 53 kg/ha

Recommandation en azote selon guide CRAAQ : 160 kg/ha (maximum)

Printemps : 64 kg/ha

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 48 kg/ha

coupe :

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 48 kg/ha

### Dates d'application des fertilisants :

Printemps : 06— mai-15

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 22— juin-15

coupe :

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 24-août-15

### Dates des récoltes des parcelles

1<sup>ère</sup> coupe : 03— juin-15

2<sup>ème</sup> coupe : 29— juin-15

3<sup>ème</sup> coupe : 22— sept-15

### Dates de fauche ou de nettoyage des parcelles par le producteur

## 2016 : Champ H1-H2

**Localisation :** Centre de recherche de Sherbrooke; Sherbrooke

**Rotation :** Champ implanté en 2012 avec du Trèfle rouge et de la Fléole des prés

2012	2013	2014	2015	2016
Blé-Trèfle rouge-Fléole des prés	Trèfle rouge — Fléole des prés	Trèfle rouge — Fléole des prés	Fléole des prés	Fléole des prés

### Analyse de sol :

Date : Octobre 2016

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
6,0	6,5	6,9	191	79	5,3

**Texture du  
sol :** Loam à loam sableux

**Topographie :** Plane

**Fumier à l'automne :** Compost d'ensilage 18T/ha mi-septembre 2015

N disponible estimé au printemps : 25 kg/ha (PAEF 2015)

**Fumier au printemps :** Aucun

### Taux de phosphore et de potasse appliqué :

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> :** 49 kg/ha

**K<sub>2</sub>O :** 143 kg/ha

**Recommandation en azote selon guide CRAAQ :** 160 kg/ha (maximum)

Printemps : 64 kg/ha

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 48 kg/ha

coupe :

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 48 kg/ha

### Dates d'application des fertilisants :

Printemps : 29-avr-16

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 20-juin-16

coupe :

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 01-août-16

### Dates des récoltes des parcelles

1<sup>ère</sup> coupe : 06— juin-16

### Dates de fauche ou de nettoyage des parcelles par le producteur

17-juin-16

2 <sup>ème</sup> coupe :	27— juil-16	24-août-16
3 <sup>ème</sup> coupe :	20— sept-16	Aucune

## 2016 : Champ 20

Localisation : Ferme TREMCO (Val-Joli)

Rotation : Champ implanté en 2012

2012	2013	2014	2015	2016
Avoine grainée	40-60 % leg	Graminées	Graminées	Graminées

### Analyse de sol :

Date : Octobre 2016

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
4,0	6,7	7,3	145	162	6,1

Texture du sol : Loam

Topographie : Plane

Fumier à l'automne : Aucun

Fumier au printemps : Aucun

### Taux de phosphore et de potasse appliqué :

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 24 kg/ha

K<sub>2</sub>O : 122 kg/ha

Recommandation en azote selon guide CRAAQ : 160 kg/ha (maximum)

Printemps : 64 kg/ha

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 48 kg/ha

coupe :

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 48 kg/ha

### Dates d'application des fertilisants :

Printemps : 06— mai-16

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 20— juin-16

coupe :

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 16-août-16

### Dates des récoltes des parcelles

1<sup>ère</sup> coupe : 08— juin-16

2<sup>ème</sup> coupe : 27— juil-16

### Dates de fauche ou de nettoyage des parcelles par le producteur

3<sup>ème</sup> coupe :

22— sept-16

Aucune

## 2016 : Champ 75

**Localisation :** Ferme Donald Dion, St-Narcisse

**Rotation :** Champ implanté en 2013 avec de la fléole des prés

2013	2014	2015	2016
Fléole des prés	Fléole des prés	Fléole des prés	Fléole des prés

### Analyse de sol :

Date : 19 oct 2012

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
8.4	6.0	6.3	90.0	203.0	8.7

**Texture du sol :** Loam sableux (G3-Beaurivage + Neubois)

**Topographie :** Plane

**Fumier à l'automne :** Aucun

**Fumier au printemps :** Aucun

### Taux de phosphore et de potasse

**appliqué : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> :** Aucun

**K<sub>2</sub>O :** 145 kg/ha

**Recommandation en azote selon guide CRAAQ :** 160 kg/ha (maximum)

Printemps : 64 kg/ha

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 48 kg/ha

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 48 kg/ha

### Dates d'application des fertilisants :

Printemps : 13-mai-16

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 15-juin-16

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 26-juil-16

### Dates des récoltes des parcelles

1<sup>ère</sup> coupe : 15— juin-16

2<sup>ème</sup> coupe : 26— juil-16

3<sup>ème</sup> coupe : 13— sept-

16

## 2016 : Champ 13

Localisation : Ferme Pelchat Holstein inc, St-Isidore

**Rotation :** Champ implanté en 2013

2013	2014	2015	2016
			Prairie clairsemée

### Analyse de sol :

Date : Inconnue

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
5.5	5.5	6.2	54.0	130.0	5.8

**Texture du sol :** Loam limoneux (G2-Kamouraska)

**Topographie :** Plane

**Fumier à l'automne :** Aucun

**Fumier au printemps :** Aucun

### Taux de phosphore et de potasse

**appliqué : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> :** 25 kg/ha

**K<sub>2</sub>O :** 150 kg/ha

**Recommandation en azote selon guide CRAAQ :** 160 kg/ha (maximum)

Printemps : 64 kg/ha

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 48 kg/ha

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 48 kg/ha

### Dates d'application des fertilisants :

Printemps : 13-mai-16

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 15-juin-16

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 26-juil-16

### Dates des récoltes des parcelles

1<sup>ère</sup> coupe : 15-juin-16

2<sup>ème</sup> coupe : 26-juil-16

3<sup>ème</sup> coupe : 13-sept-16

## 2017 : Champ F4

Localisation : Centre de recherche de Sherbrooke; Sherbrooke

Rotation : Champ implanté en 2006

2013	2014	2015	2016	2017
Graminées	Graminées	Graminées	Graminées	Graminées

### Analyse de sol :

Date : Novembre 2016

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
5,9	6,9	6,9	134,0	77,0	3,3

Texture du sol : Loam sableux

Topographie : Pente

Fumier à l'automne : 15T/ha de purin de bovins en août 2016 (1 kgN/T)

Fumier au printemps : Aucun

### Taux de phosphore et de potasse appliqué :

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 45 kg/ha

K<sub>2</sub>O : 120 kg/ha

Recommandation en azote selon guide **160 kg/ha (maximum)**

### CRAAQ :

Printemps : 64 kg/ha

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 48 kg/ha

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 48 kg/ha

### Dates d'application des fertilisants :

Printemps : 03— mai-17

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 18— juil-17

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 06-sept-17

### Dates des récoltes des parcelles

1<sup>ère</sup> coupe : 12— juin-17

2<sup>ème</sup> coupe : 29— août-17

3<sup>ème</sup> coupe : 23— oct-17

### Dates de fauche ou de nettoyage des parcelles par le producteur

12-juil-17

Aucune

Aucune

## 2017 : Champ 20

Localisation : Ferme TREMCO (Val-Joli)

Rotation : Champ implanté en 2012

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
	Avoine grainée	40-60 % leg	Graminées	Graminées	Graminées	Graminées

### Analyse de sol :

Date : Octobre 2016

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
4,0	6,7	7,3	145	162	6,1

Texture du sol : Loam

Topographie : Pente

Fumier à l'automne : Aucun

Fumier au printemps : Aucun

### Taux de phosphore et de potasse appliqué :

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 24 kg/ha

K<sub>2</sub>O : 122 kg/ha

Recommandation en azote selon guide CRAAQ : 160 kg/ha (maximum)

### CRAAQ :

Printemps : 64 kg/ha

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 48 kg/ha

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 48 kg/ha

### Dates d'application des fertilisants :

Printemps : 03— mai-17

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 25— juil-17

Après 2<sup>ème</sup> coupe : Aucun

### Dates des récoltes des parcelles

1<sup>ère</sup> coupe : 12— juin-17

2<sup>ème</sup> coupe : 29— août-17

3<sup>ème</sup> coupe : Aucune

### Dates de fauche ou de nettoyage des parcelles par le producteur

Aucune

**2017 : Champ**  
**Localisation : Ferme L Bisson et fils inc., Ste Marie**

**Rotation :**

2013	2014	2015	2016	2017
	mélange trèfle — fléole	mélange trèfle — fléole	mélange trèfle — fléole	fléole + pissenlit

**Analyse de sol :**

Date :	11 oct-2010				
		pH	K-MIII	P-MIII	
M.O.	pH eau	tampon	(kg/ka)	(kg/ka)	ISP1
6.2	6.5	6.7	293.0	285.0	10.2

**Texture du sol :** Loam sableux Warwick

**Topographie :** Plane

**Fumier à l'automne :** Aucun

**Fumier au printemps :** Aucun

**Taux de phosphore et de potasse**

**appliqué : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> :** Aucun

**K<sub>2</sub>O :** 15 kg/ha

**Recommandation en azote selon guide CRAAQ :** 160 kg/ha (maximum)

Printemps : 64 kg/ha

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 48 kg/ha

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 48 kg/ha

**Dates d'application des fertilisants :**

Printemps : 16-mai-17

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 13-juin-17

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 24-juil-17

**Dates des récoltes des parcelles**

1<sup>ère</sup> coupe : 13-juin-17

2<sup>ème</sup> coupe : 24-juil-17

3<sup>ème</sup> coupe : 14-sept-17

**2017 : Champ**  
**Localisation : Ferme Lp Laflamme, St Anselme**

**Rotation :** Champ implanté en

2015	2016	2017
fléole-luzerne	fléole — luzerne	fléole (les parcelles ont été établies dans un secteur du champ où la luzerne a gelé)

**Analyse de sol :**

Date : 25 nov. 2015

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
7.1	6.7	7.1	302.0	143.0	6.7

**Texture du sol :** Argile Kamouraska

**Topographie :** Plane

**Fumier à l'automne :** Aucun

**Fumier au printemps :** Aucun dans les parcelles

**Taux de phosphore et de potasse**

**appliqué : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> :** 20 kg/ha

**K<sub>2</sub>O :** 15 kg/ha

**Recommandation en azote selon guide CRAAQ :** **160 kg/ha (maximum)**

Printemps : 64 kg/ha

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 48 kg/ha

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 48 kg/ha

**Dates d'application des fertilisants :**

Printemps : 16-mai-17

Après 1<sup>ère</sup> coupe : 13-juin-17

Après 2<sup>ème</sup> coupe : 24-juil-17

**Dates des récoltes des parcelles**

1<sup>ère</sup> coupe : 13-juin-17

2<sup>ème</sup> coupe : 24-juil-17

3<sup>ème</sup> coupe : 14-sept-17

## Annexe 2 Description des sites en maïs

### 2015 : Champ JO-6

#### Localisation : Centre de recherche de Sherbrooke; Sherbrooke

##### Rotation :

2012	2013	2014	2015
Blé grainé	Trèfle rouge-ladino — mil	Trèfle rouge-ladino-mil	Maïs — Ensilage

##### Analyse de sol :

Date :	octobre 2015				
M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
6,3	6,4	6,7	165,0	122,0	4

Texture du sol : Loam sableux

Topographie : Pente

Fumier à l'automne : Aucun

##### Fertilisation au printemps :

<i>Zone avec fumier</i>					kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
		Date	Dose				
Fumier de bovins laitiers	Pré-semis	04-mai-15	20 T/ha		50	38	107
22-9-4	<b>Semis</b>	<b>08-mai-15</b>	200 kg/ha		44	18	8
0-0-60	Présemis	05-mai-15	36				22
Post-levée variable selon les traitements		25-juin-15			-	0	0
<b>Total</b>					-	<b>56</b>	<b>137</b>

<i>Zone sans fumier</i>					kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
		Date	Dose				
22-9-4	Semis	08-mai-15	200 kg/ha		44	18	8
P et K ajouté à la main	Présemis	05-mai-15				39	121

Post-levée variable selon les traitements	25-juin-15		-	<u>0</u>	<u>0</u>
		<b>Total</b>		<b>57</b>	<b>129</b>

**Dates des récoltes des parcelles**

Nombre de feuilles	V6	Date	25— juin-15
Fin de saison	Ensilage	Date	22— sept — 15

## 2015 : Champ 13

### Localisation : Val-Joli — TREMCO

#### Rotation :

2011	2012	2013	2014	2015
Maïs-Ensilage	Soya	Maïs-Ensilage	Soya	Maïs — Ensilage

#### Analyse de sol :

Date :	01— oct-14				
M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka )	P-MIII (kg/ka)	ISP1
5,2	6,9	7,0	264,0	88,0	4

Texture du sol : Loam

Topographie : Pente

Fumier à l'automne : Aucun

#### Fertilisation au printemps :

				Dose	kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ ha
<b>Zone avec fumier</b>							
Lisier de porc	Pré-semis	mi-mai	22	T/ha	55	46	60
17-12-17	<b>Semis</b>	<b>mi-mai</b>	224	kg/ha	39	26	39
Post-levée variable selon les traitements		25-juin-15			-	0	0
Total				<b>Total</b>	-	<b>72</b>	<b>99</b>

				Dose	kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ ha
<b>Zone sans fumier</b>							
17-12-17	<b>Semis</b>	<b>mi-mai</b>	200	kg/ha	39	26	39
P et K ajouté à la main		mi-mai				23	53
Post-levée variable selon les traitements		25-juin-15			-	0	0



## 2016 : Champ J1-J2

### Localisation : Centre de recherche de Sherbrooke; Sherbrooke

**Rotation :** 2016\_Maïs-Ensilage  
 2012 2013 2014 2015  
 Prairie de graminée Prairie de graminée Prairie de graminée Blé d'automne

#### Analyse de sol :

Date : octobre 2016

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
5,5	6,8	6,9	171,0	158,0	7

**Texture du sol :** Loam à loam sableux

**Topographie :** Pente

			Dose		kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
<b>Fumier à l'automne :</b>	Fumier de bovins laitiers	31-août-15	20	T/ha	44	30	86

#### Fertilisation au printemps :

			Dose		kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
23-9-5	<b>Semis</b>	<b>06-mai-16</b>	220	kg/ha	50	20	11

P et K ajouté à la main	27-mai-16					14	83
Post-levée variable selon les traitements	08-juil-16				-	0	0
			<b>Total</b>		-	<b>64</b>	<b>180</b>

#### Dates des récoltes des parcelles

Nombre de feuilles	V8	Date	06-juil-16
Fin de saison	Ensilage	Date	20-sept-16



## 2016 : Champ 29

### Localisation : Stanstead — Laliberté

**Rotation :** 2016\_Maïs-Ensilage  
 2013 2014 2015  
 Prairie graminées Prairie graminées Prairie graminées

#### Analyse de sol :

Date : 01-oct-14

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
5,6	5,9	6,3	65,0	125,0	4

**Texture du sol :** Loam

#### Topographie :

**Fumier à l'automne :** Liser de bovins laitiers

Dose	kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
2 500 gal/ac	29	21	78

#### Fertilisation au printemps :

	Dose	kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
16-16-16 <b>Semis</b>	150 kg/ha	28	28	28
P et K ajouté à la main	20-juin-16		21	74
Post-levée variable selon les traitements	08-juil-16		0	0
<b>Total</b>		<b>-</b>	<b>70</b>	<b>180</b>

#### Dates des récoltes des parcelles

Nombre de feuilles	V8	Date	06-juil-16
Fin de saison	Ensilage	Date	02-sept-16

## 2016 : Champ 3

### Localisation : Ferme Donald Dion, Saint-Narcisse

<b>Rotation :</b>	2016_Maïs-Ensilage		
2012	2013	2014	2015
foin	foin	maïs-ensilage	maïs-ensilage

#### Analyse de sol :

Date :	17-oct-12				
M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
7,3	6,5	7,0	78,0	182,0	6

**Texture du sol :** Loam sableux G3 — Beurivage + Neubois

**Topographie :** plate

<b>Fumier à l'automne :</b>	Bovins laitiers	Fin sept	Dose		kg de N/ha	kg de P2O5/ha	kg de K2O/ha
			25	T/ha	33	40	83

#### Fertilisation au printemps :

Lisier de vache		début mai 2016	Dose		kg de N/ha	kg de P2O5/ha	kg de K2O/ha
			35	T/ha	57	56	116
	<b>Semis</b>	<b>Mi mai</b>		kg/ha	50	0	0
Post-levée variable selon les traitements		2016-07-05			-	0	0
			<b>Total</b>		<b>-</b>	<b>97</b>	<b>198</b>

#### Dates des récoltes des parcelles

Nombre de feuilles	V8	Date	05— juil-16
Fin de saison	Ensilage	Date	13-sept-16

## 2016 : Champ 5

### Localisation : Ferme André Labonté, Saint-Isidore

**Rotation :** 2016\_Maïs-Ensilage  
 2012 2013 2014 2015 2016  
 foin graminées soya maïs-ensilage maïs-ensilage

#### Analyse de sol :

Date : 12 août 2011

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
5,2	6,4	6,7	108,0	142,0	6

**Texture du sol :** Loam — loam limoneux (G2 - Neubois)

**Topographie :** plate

**Fumier à l'automne :** Aucun

#### Fertilisation au printemps :

<i>Pas de fumier, ni de lisier</i>		Dose	kg de N/ha	kg de P2O5/ha	kg de K2O/ha
Démarreur 14 -11 -13	<b>Semis</b>	23-mai-16	90 kg/ha	13	10
Post-levée variable selon les traitements		05-juil-16			
			<b>Total</b>	<b>-</b>	<b>10</b>
					<b>12</b>

#### Dates des récoltes des parcelles

Nombre de feuilles	V8	Date	05-juil-16
Fin de saison	Ensilage	Date	04-oct-16

## 2017 : Champ H3N

### Localisation : Centre de recherche de Sherbrooke; Sherbrooke

**Rotation :** 2017\_Maïs-Ensilage  
 2013 2014 2015 2016  
 Prairie de graminées Blé d'automne Maïs-Ensilage Soya

**Analyse de sol :**

Date : octobre 2016

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
4,3	7,0	7,1	131,0	128,0	6

**Texture du sol :** Loam argileux, loam, loam sableux

**Topographie :** légère pente

**Fumier à l'automne :** Aucun

**Fertilisation au printemps :**

**Zone avec fumier**

		Dose	kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
Fumier de bovins laitiers	19-mai-17	29 T/ha	70	57	147
Applique à la main variable	29 et 30 mai 2017		50 ou 25	22	22
Post-levée variable selon les traitements	12-juil-17			0	0
		<b>Total</b>	<b>-</b>	<b>79</b>	<b>169</b>

**Semis 24-mai-17**

**Zone sans fumier**

		kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
Applique à la main variable	29 et 30 mai 2017	50 ou 25	22	22
P et K ajouté à la main	14-juin-17		57	147

Post-levée variable selon les traitements

12-juil-17

		<u>0</u>	<u>0</u>
<b>Total</b>	-	<b>79</b>	<b>169</b>

**Dates des récoltes des parcelles**

Nombre de feuilles      V6 et V8

Date    4 juillet 2017 et 12 juillet 2017

Fin de saison            Ensilage

Date    25 et 26 septembre 2017

## 2017 : Champ 1

### Localisation : Val-Joli — Laurent Tremblay

**Rotation :** 2017\_Maïs-Ensilage  
 2013 2014 2015 2016  
 Pr 40-60 % leg Pr 40-60 % leg Pr 40-60 % leg Prairie de graminées

**Analyse de sol :**

Date : 23 octobre 2012

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
5,3	6,7	7,3	360,0	208,0	709

**Texture du sol :** Loam limoneux

**Topographie :** Valonné

**Fumier à l'automne :** Aucun

**Fertilisation au printemps :**

**Zone avec fumier**

	Dose		kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
Lisier de bovins laitiers	39	T/ha	60	47	120
Applique à la main variable			25 ou 50	26	10
Post-levée variable selon les traitements		20-juil-17	-	<u>0</u>	<u>0</u>
			<b>Total</b>	<b>73</b>	<b>130</b>

**Semis**

**Zone sans fumier fumier**

			kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
Applique à la main variable			25 ou 50	26	10
P et K ajouté à la main				47	120
Post-levée variable selon les traitements		20-juil-17	-	<u>0</u>	<u>0</u>
			<b>Total</b>	<b>73</b>	<b>130</b>

123

### Dates des récoltes des parcelles

Nombre de feuilles      V8  
Fin de saison            Ensilage

Date 20-juil-17

Date 05-oct-17

## 2017 : Champ 09,

### Localisation : Saint-Odilon

**Rotation :** 2017\_Maïs-Ensilage  
 2014 2015 2016  
 foin (graminées) foin (graminées) maïs-ensilage

**Analyse de sol :**

Date : 01-juin-15

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
7,5	6,1	6,1	127,0	85,0	3

**Texture du sol :** Loam graveleux Leeds + Ste-Marie

**Topographie :** plate

<b>Fumier à l'automne :</b>	Aucun	Dose	T/ha	kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
	0 - 0 - 60 appliqué avant le labour					60

**Fertilisation au printemps :**

rien (problème avec le forfaitaire)		Dose		kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
Pas de fumier, ni de lisier						
'14-11-13 appliqué à la volée		pré-semis	214 kg/ha	30	24	28
'8-17-20	<b>Semis</b>	20-mai-17	238 kg/ha	19	4	48
Post-levée variable selon les traitements		05-juil-17		-		
			<b>Total</b>	<b>-</b>	<b>28</b>	<b>135</b>

**Dates des récoltes des parcelles**

Nombre de feuilles V7 Date 05-juil-17

Fin de saison

Ensilage

Date 10-oct-18

## 2017 : Champ 14

### Localisation : Saint-Vallier

**Rotation :** 2017\_Maïs-Ensilage

2014	2015	2016
prairie de légumineuse (implantation)	prairie de légumineuse	Prairie graminée

**Analyse de sol :**

Date : 17-oct-14

M.O.	pH eau	pH tampon	K-MIII (kg/ka)	P-MIII (kg/ka)	ISP1
5,2	6,7	6,8	533,0	73,0	3

**Texture du sol :** Kamouraska (argile)

**Topographie :** plate

<b>Fumier à l'automne :</b>	Bovins laitiers	Dose		kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
		19	T/ha	43	68	101

**Fertilisation au printemps :**

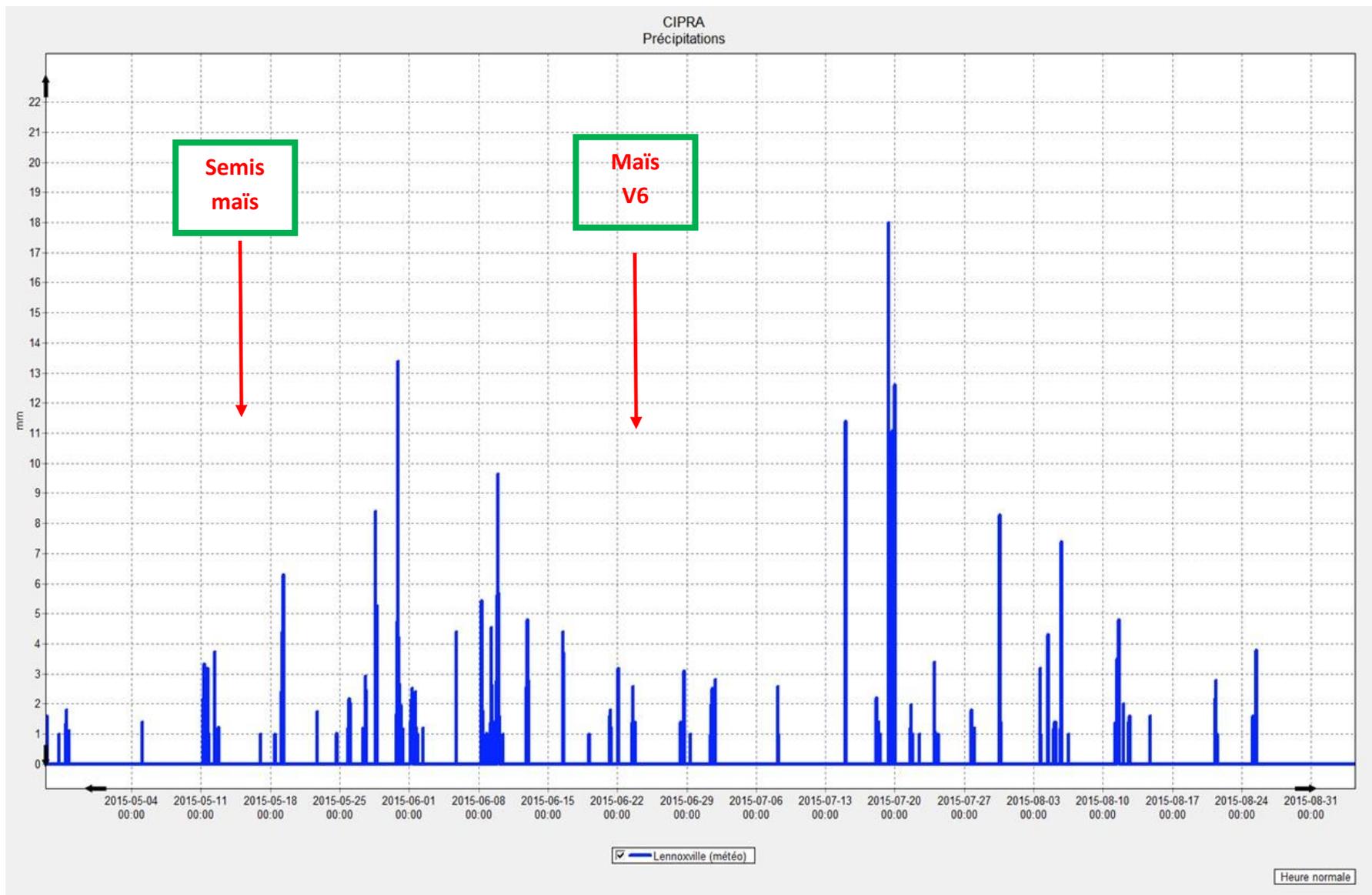
			Dose		kg de N/ha	kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	kg de K <sub>2</sub> O/ha
Pas de fumier ou de lisiers				T/ha			
24-9-0	<b>semis</b>	24-mai-17	250	kg/ha	60	23	0
Post-levée variable selon les traitements		05-juil-17			-		
			<b>Total</b>		<b>-</b>	<b>91</b>	<b>101</b>

**Dates des récoltes des parcelles**

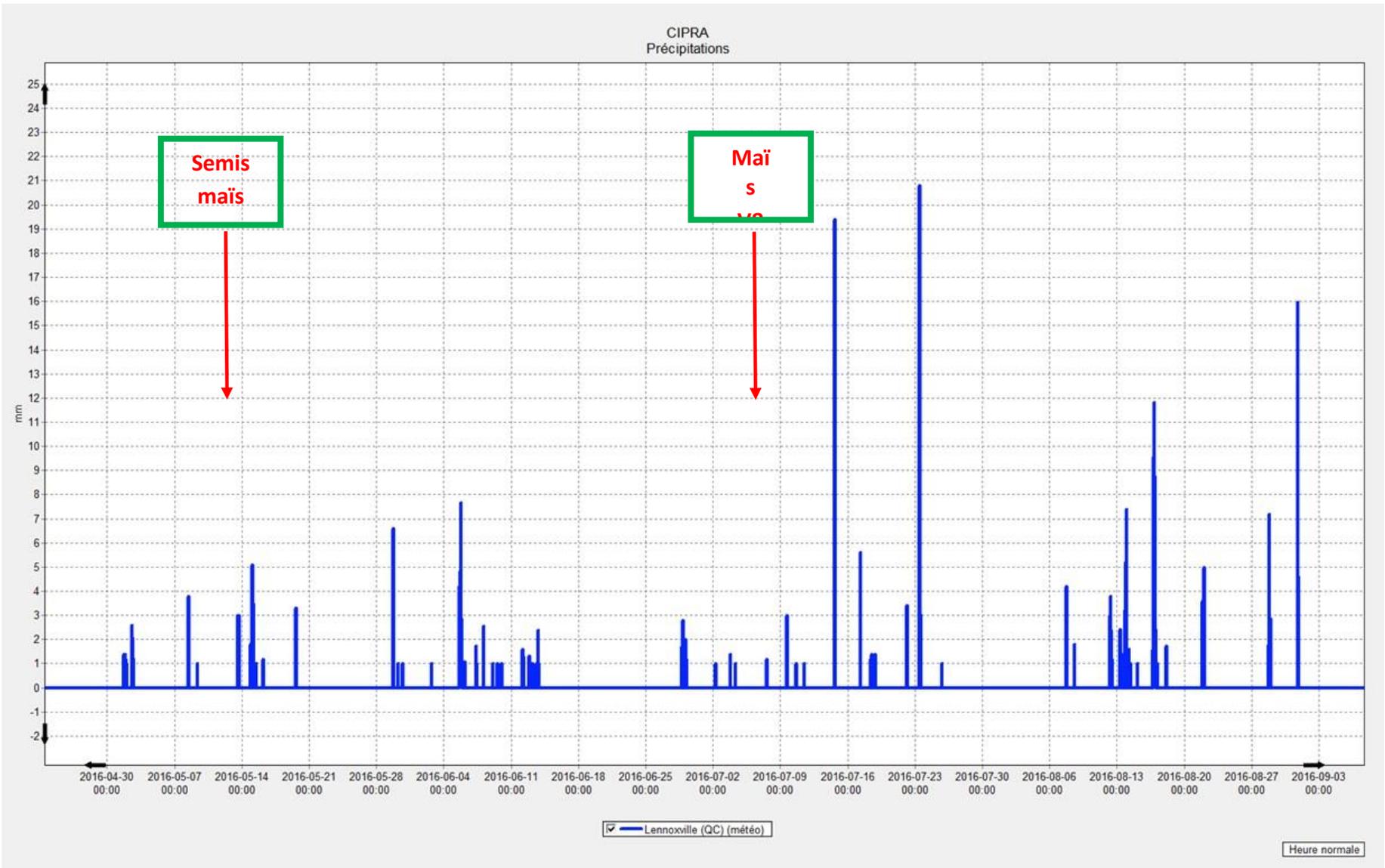
Nombre de feuilles	V8	Date	05-juil-17
Fin de saison	Ensilage	Date	06-oct-18

## Annexe 3 Données météorologiques à Lennoxville

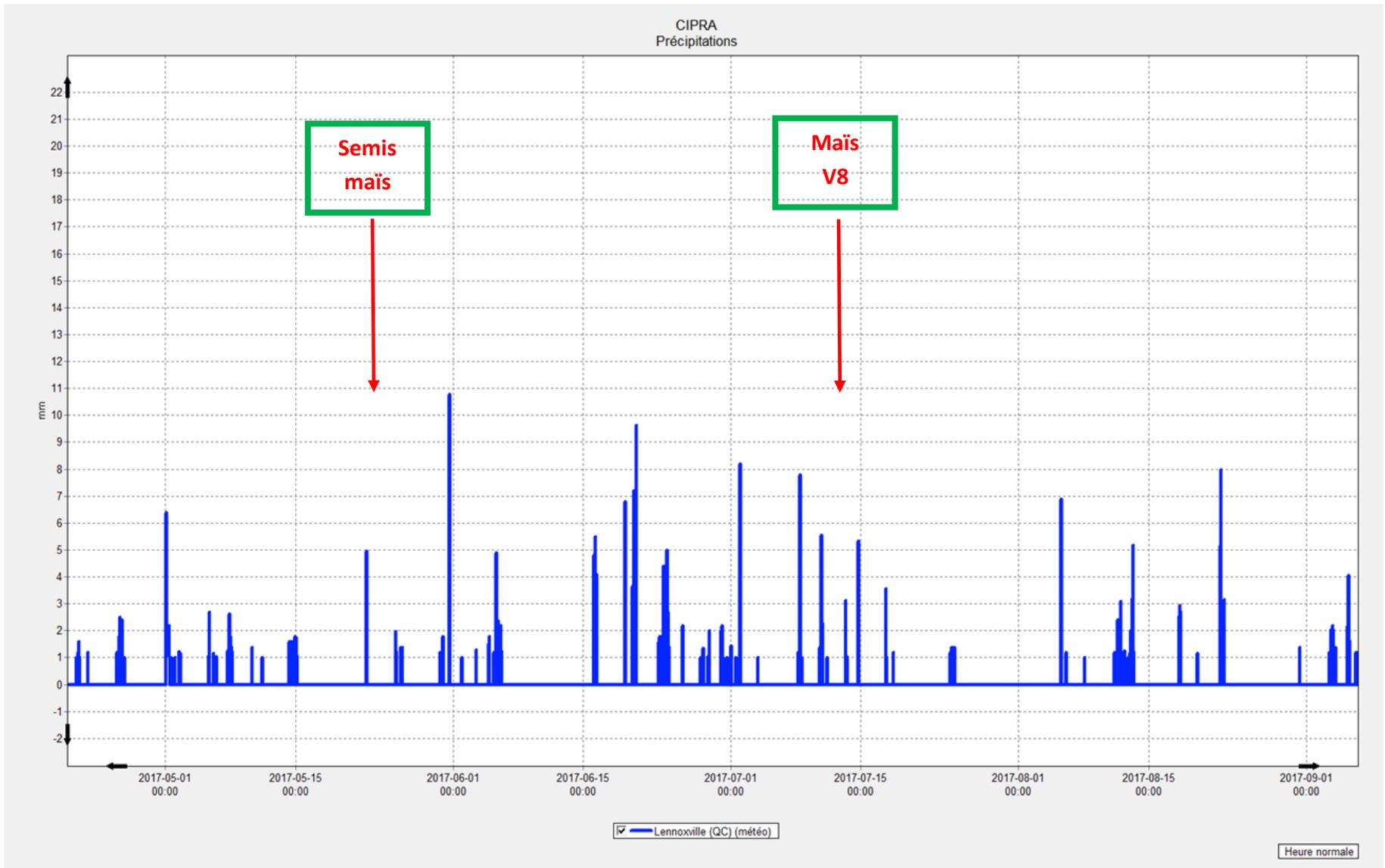
### LENNOXVILLE 2015



# LENNOXVILLE 2016

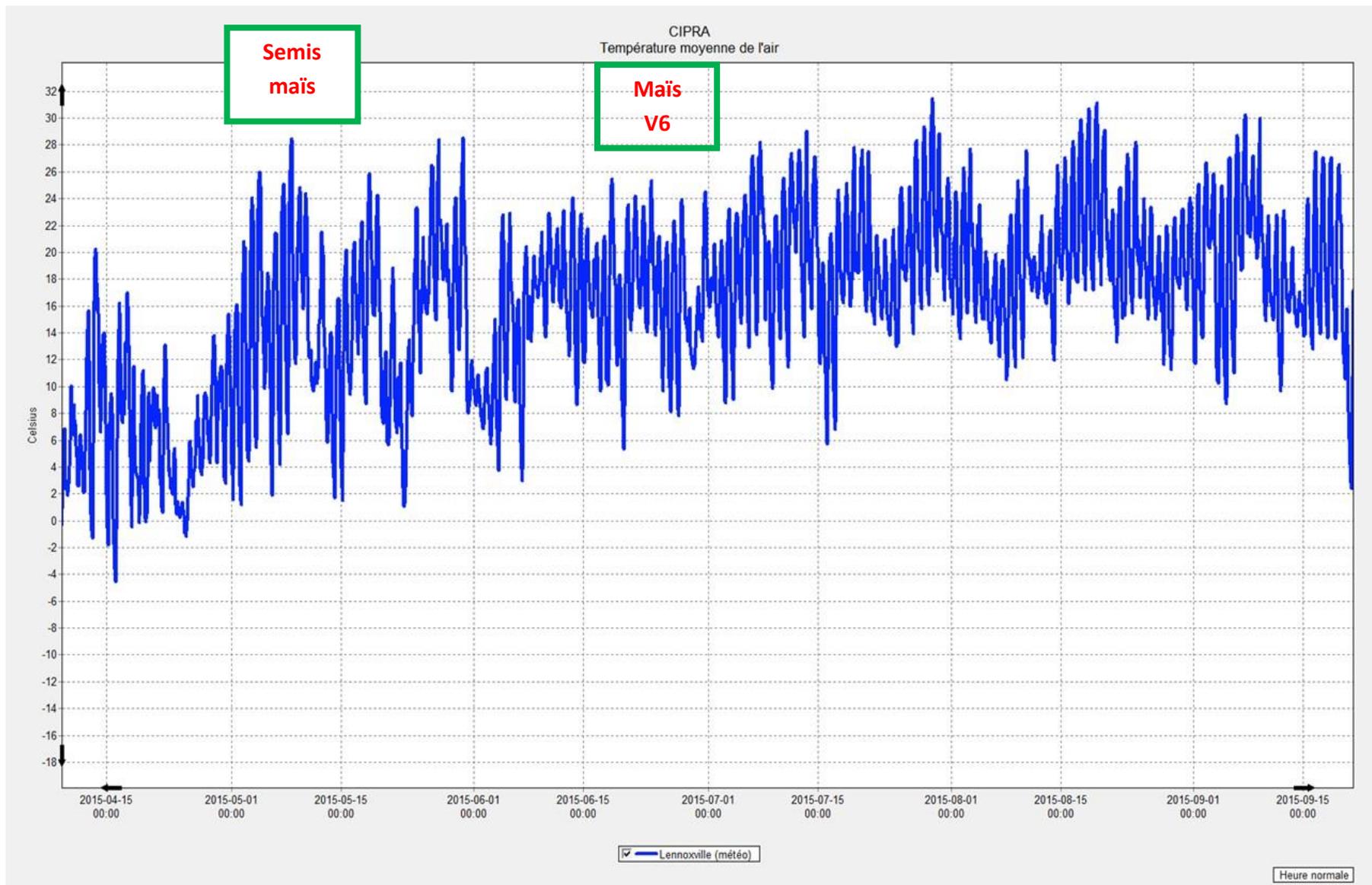


# LENOXVILLE 2017

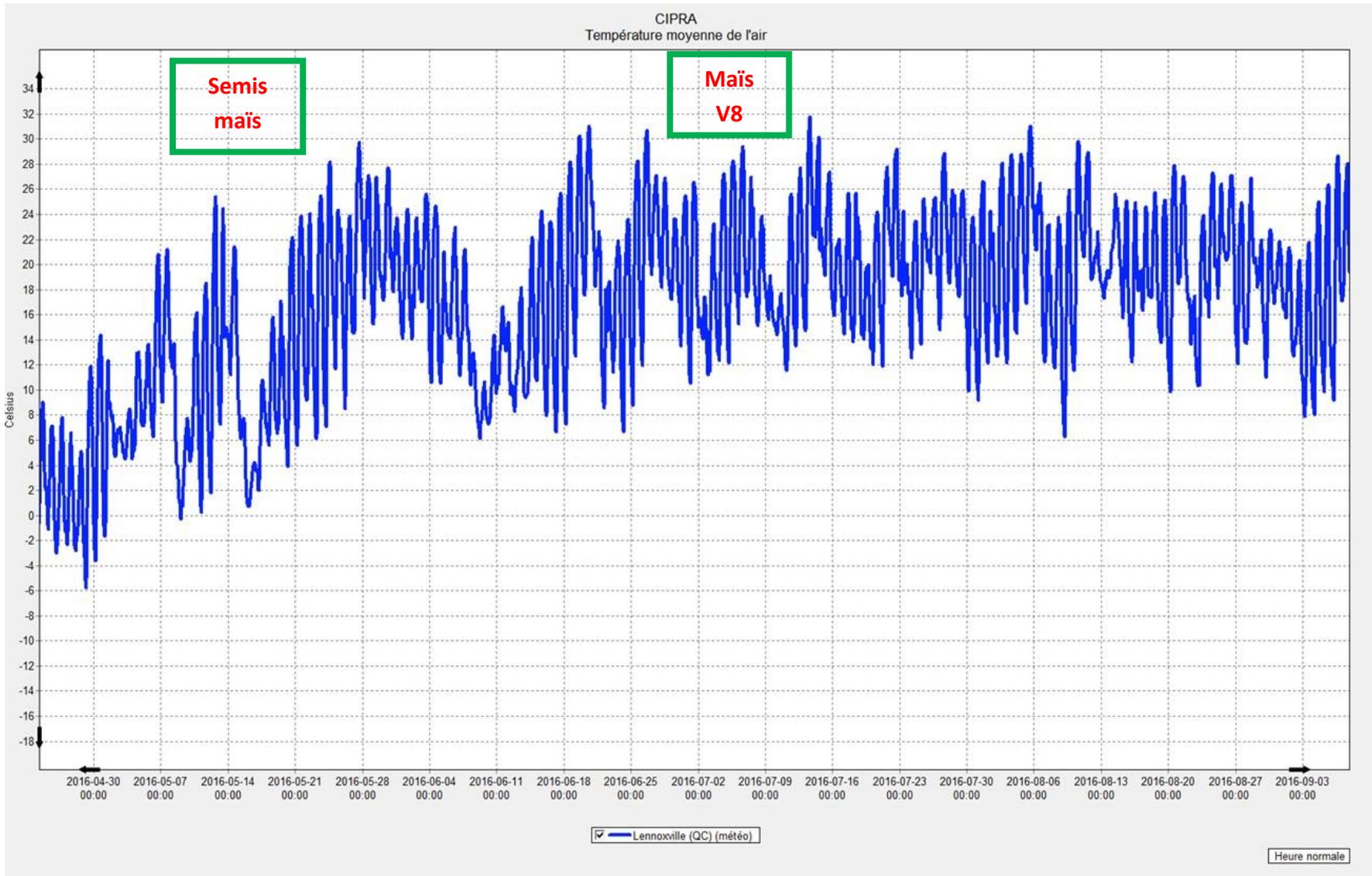


Utilisation de l'indice de nutrition azoté pour optimiser la fertilisation dans le maïs fourrager et les prairies de graminées

# LENOXVILLE 2015

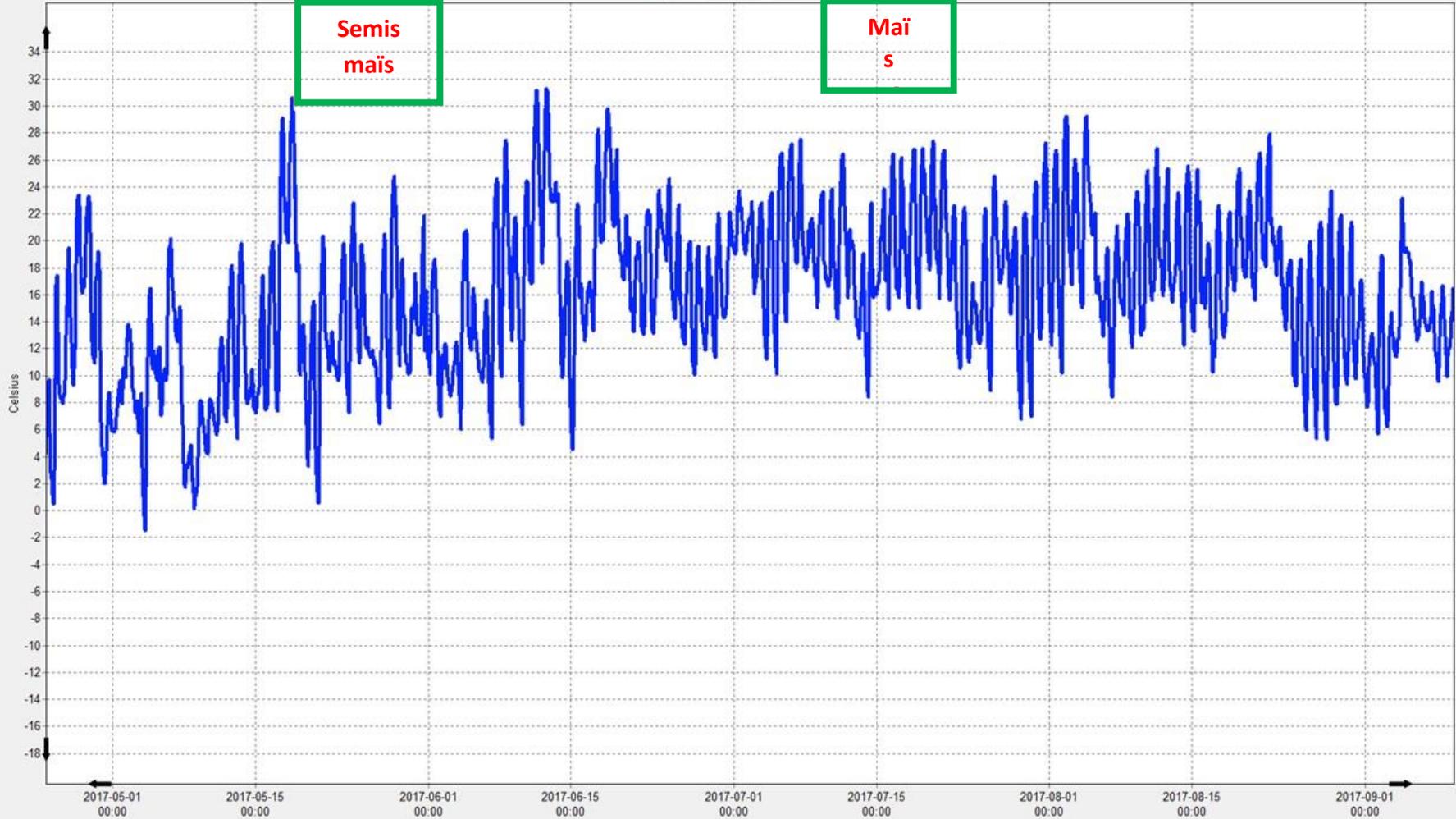


# LENOXVILLE 2016



# LENNOXVILLE 2017

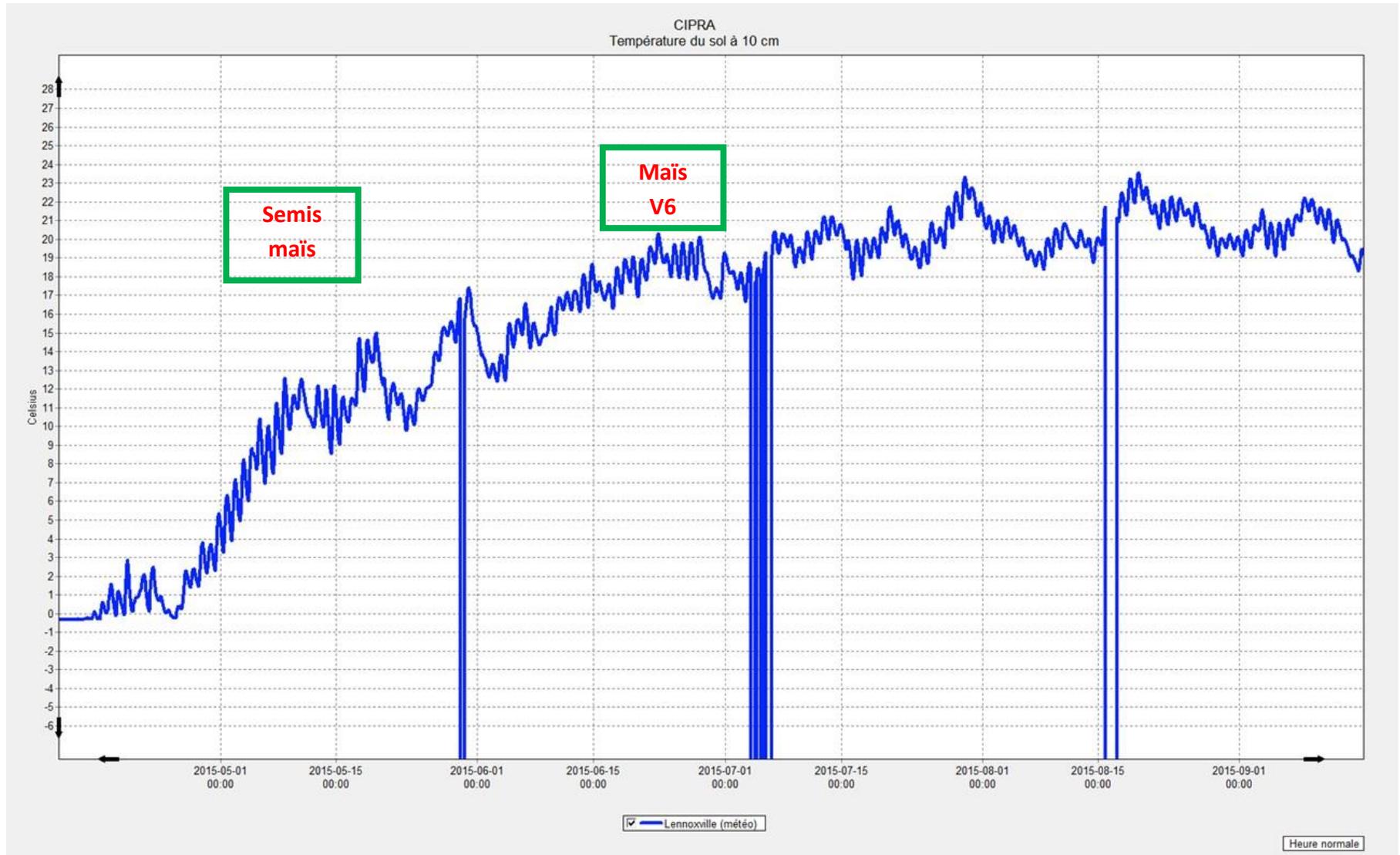
CIPRA  
Température moyenne de l'air



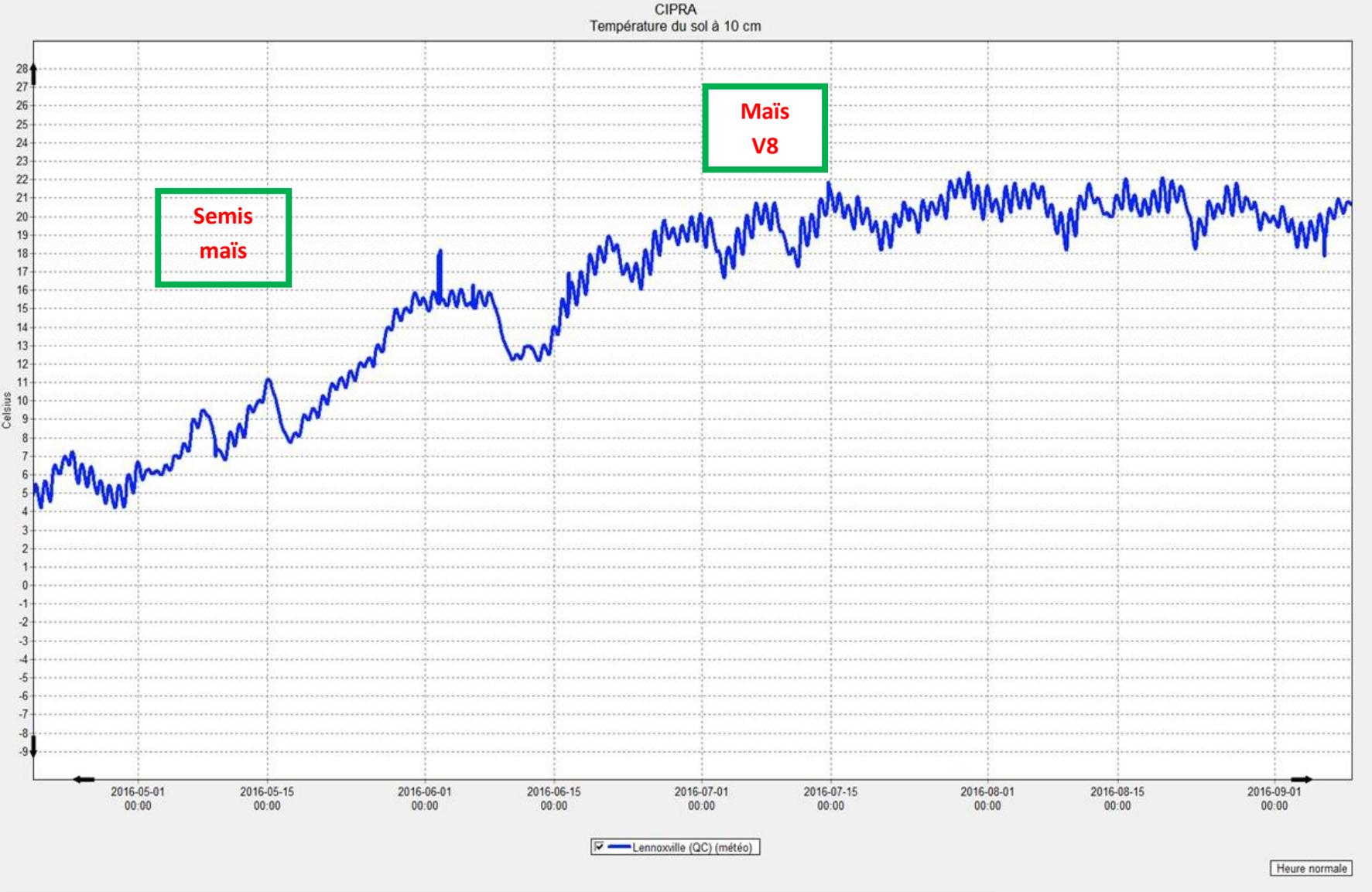
Lennoxville (QC) (météo)

Heure normale

# LENNOXVILLE 2015

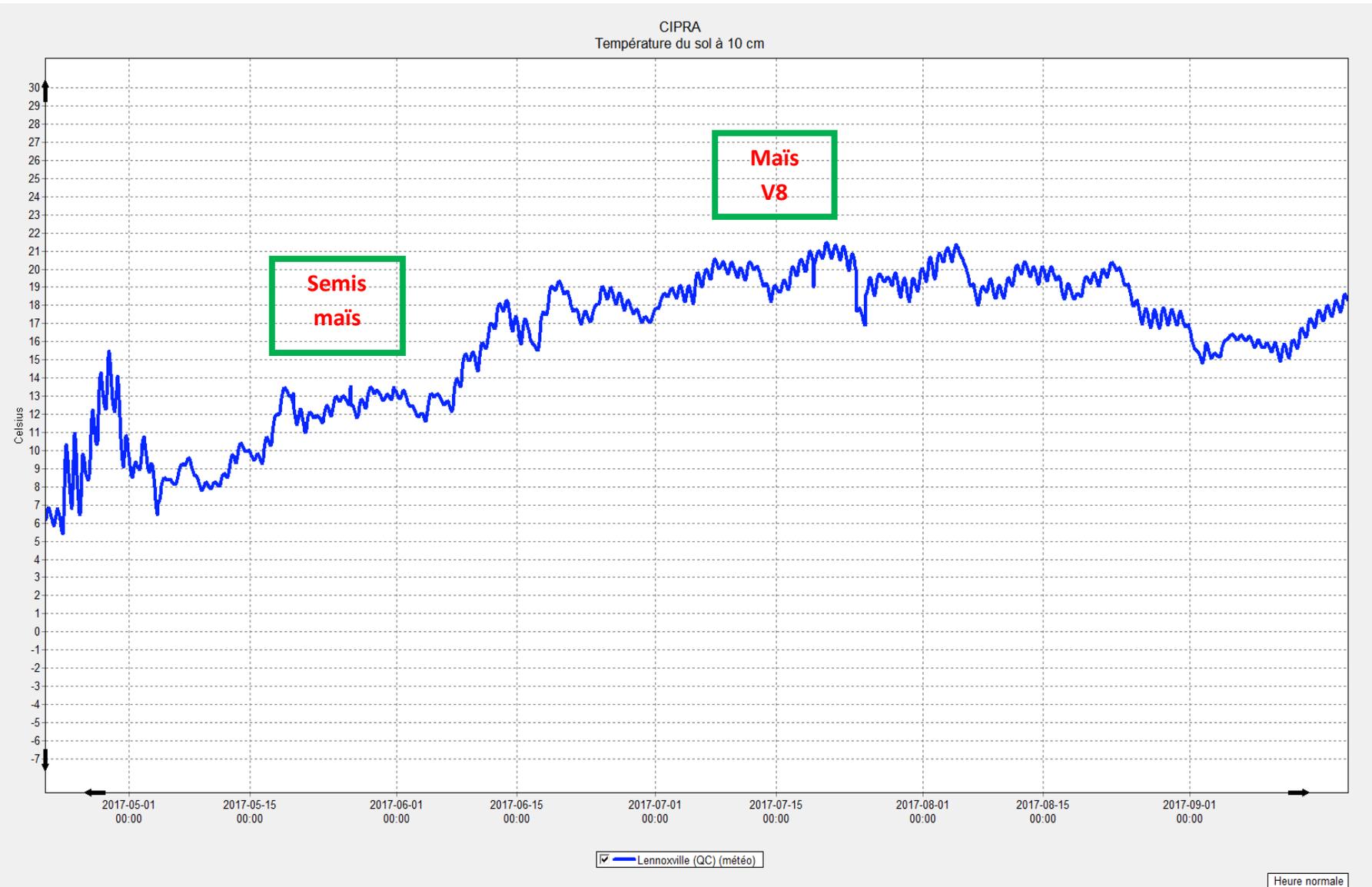


# LENOXVILLE 2016



Utilisation de l'indice de nutrition azoté pour optimiser la fertilisation dans le maïs fourrager et les prairies de graminées

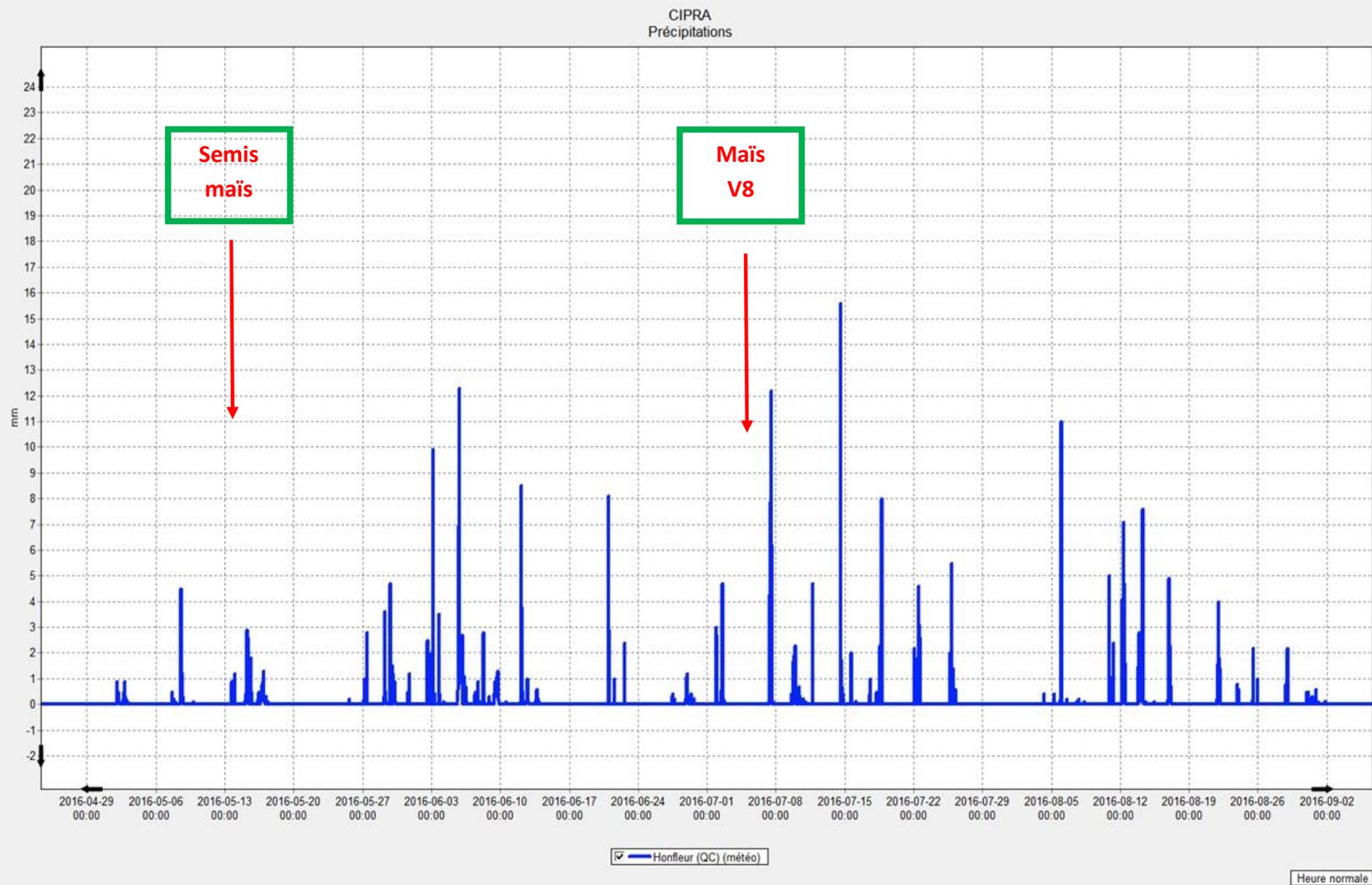
# LENNOXVILLE 2017



Utilisation de l'indice de nutrition azoté pour optimiser la fertilisation dans le maïs fourrager et les prairies de graminées

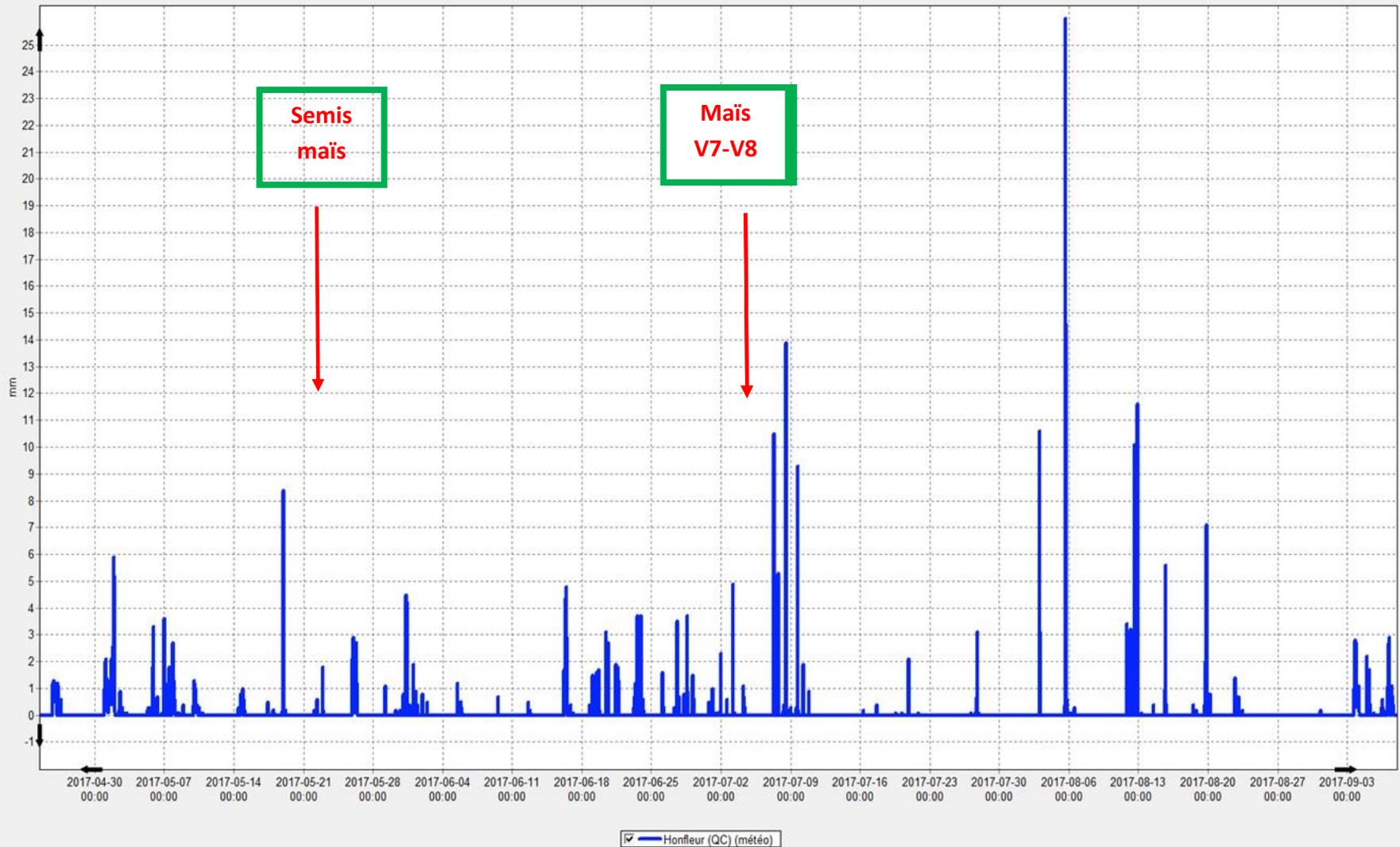
## Annexe 4 Données météorologiques à Honfleur

### HONFLEUR 2016



# HONFLEUR 2017

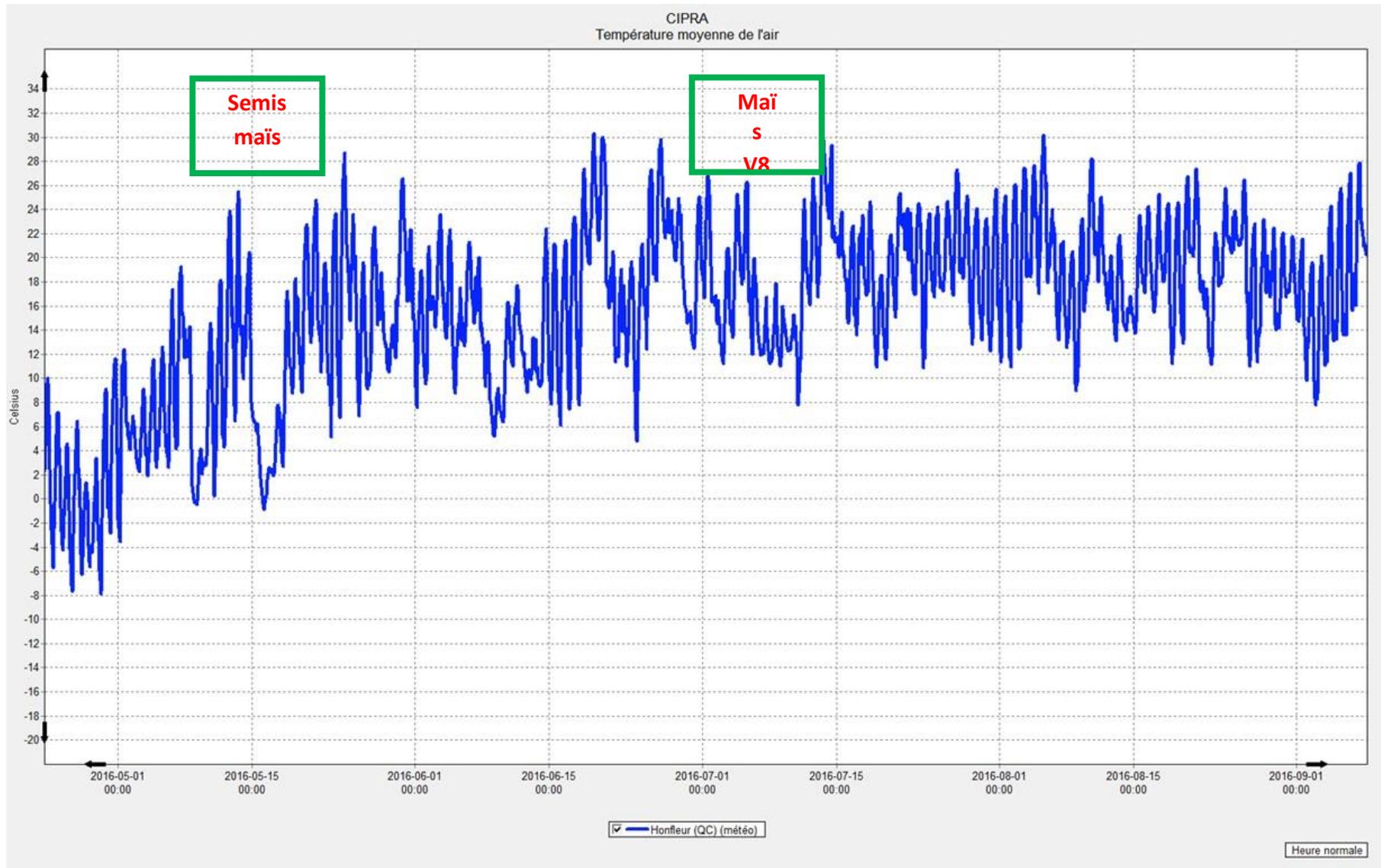
CIPRA  
Précipitations



☑ Honfleur (QC) (météo)

Heure normale

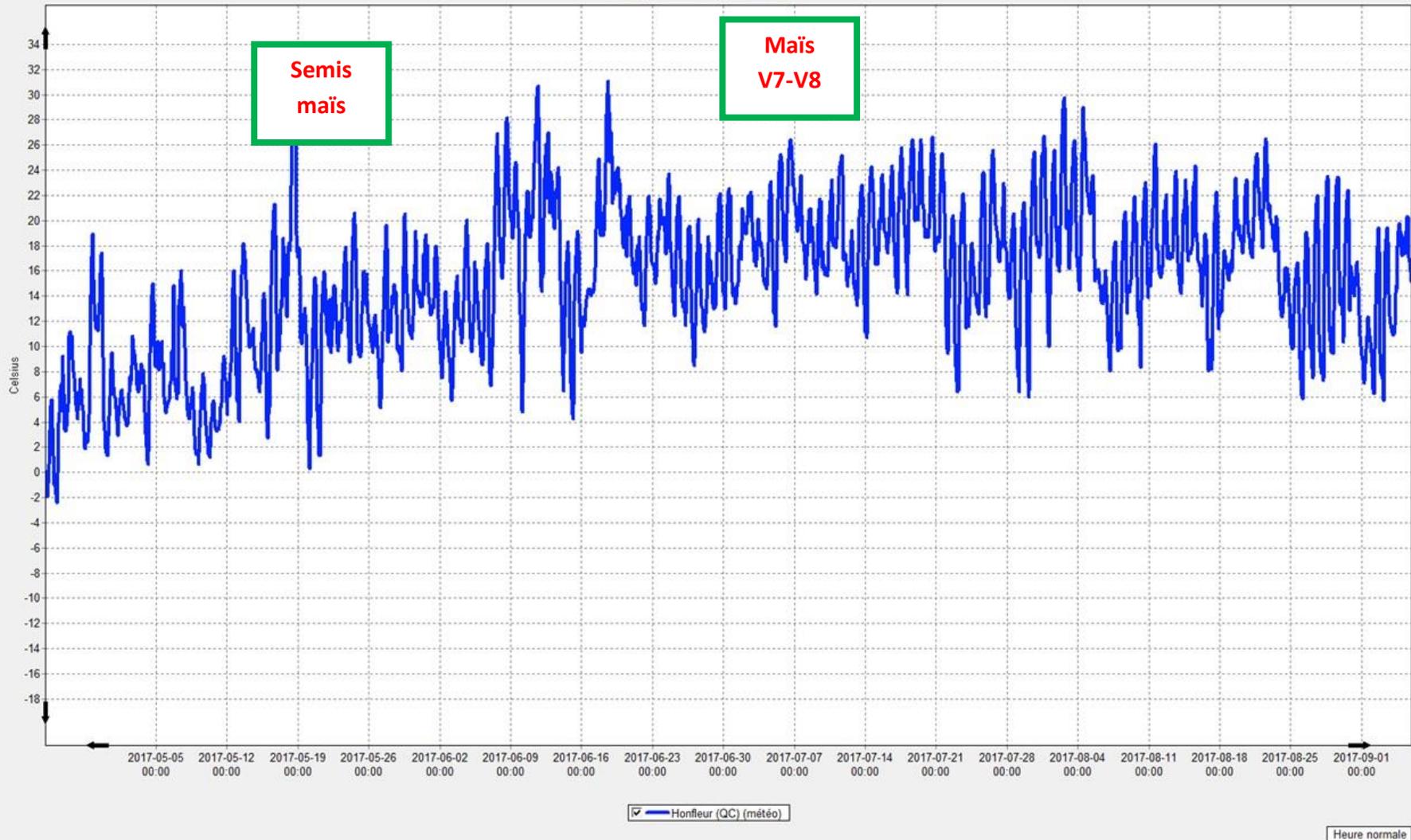
# HONFLEUR 2016



Utilisation de l'indice de nutrition azoté pour optimiser la fertilisation dans le maïs fourrager et les prairies de graminées

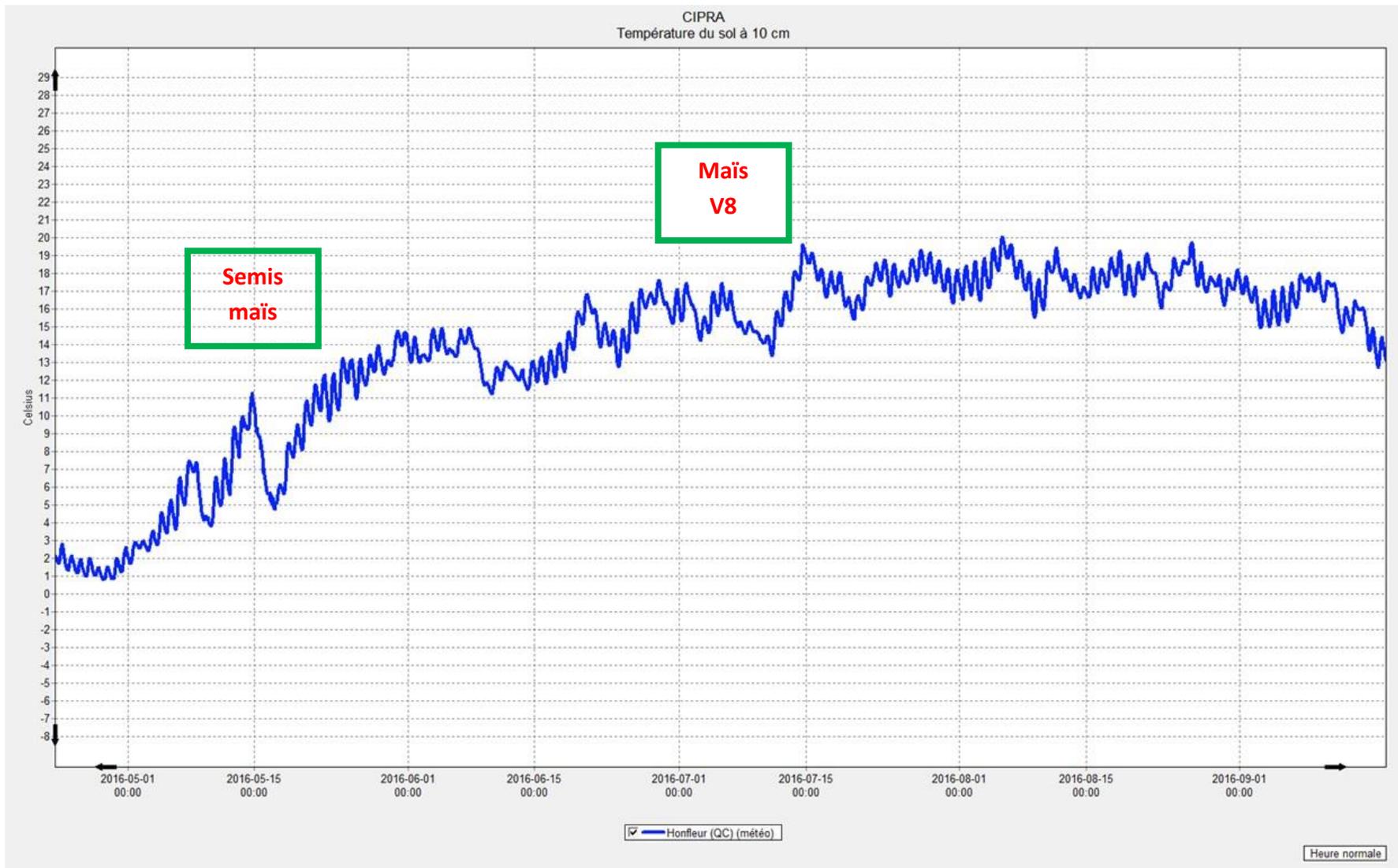
# HONFLEUR 2017

CIPRA  
Température moyenne de l'air

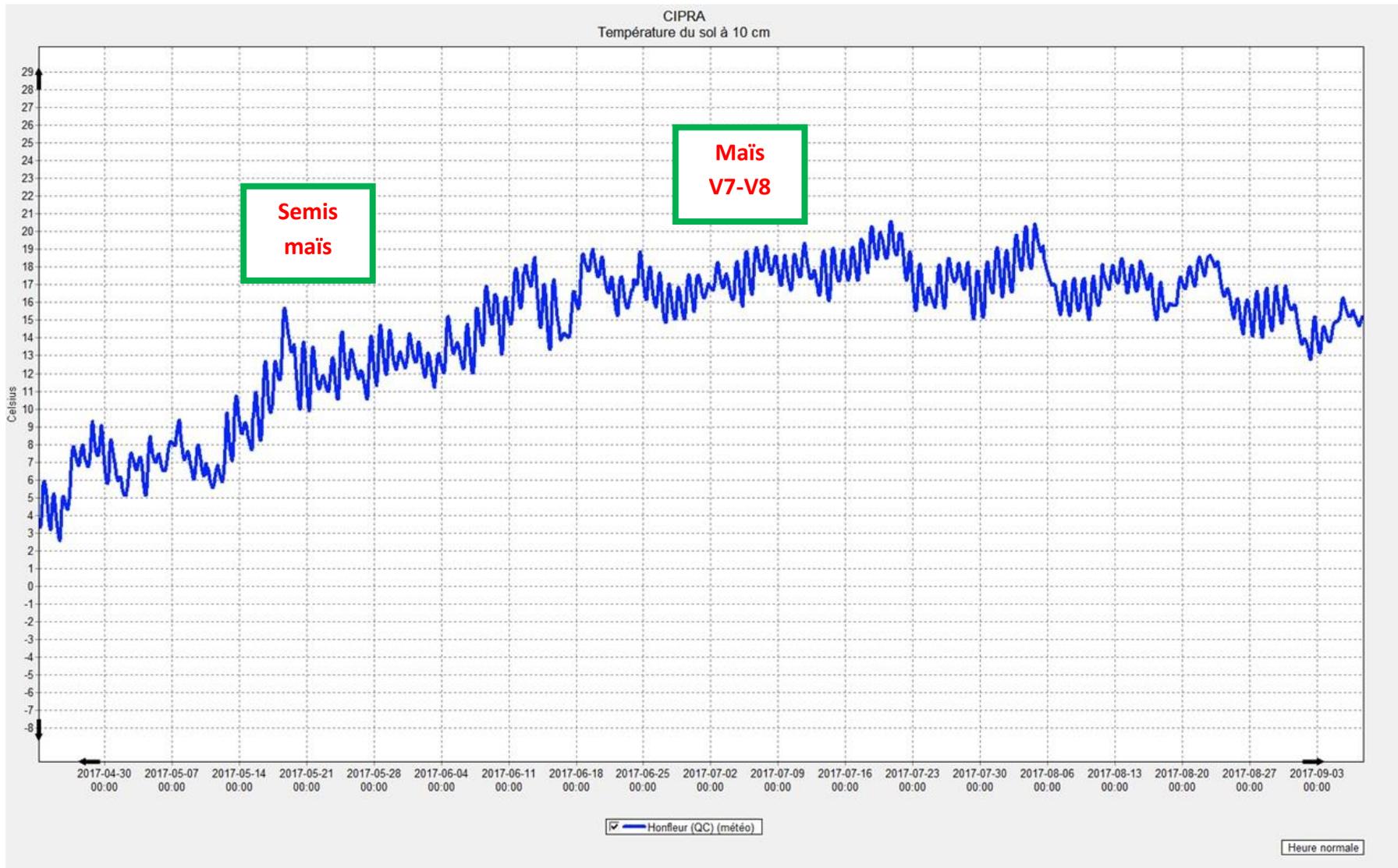


Calculer le nombre de grains par épis, la rétention dans le maïs récolté, et les plantes de grainées

# HONFLEUR 2016



# HONFLEUR 2017



## Annexe 5 Analyses statistiques pour les prairies

Valeurs de F et niveaux de signification pour le rendement total, le prélèvement en N 2, la teneur en N total et l'Indice de nutrition azoté, selon les coupes (combinées ou non) suite à l'application de différentes doses de N au printemps et après la coupe 1.

<b>2015 2 sites coupe 1</b>	<b>Rendement (coupe1)</b>	<b>Prélèvement en N (coupe1)</b>	<b>Teneur en N total (coupe1)</b>	<b>INA (coupe1)</b>
Site	8.12*	1.07	6.71*	0.38
Dose N	6.41**	10.48***	8.88***	10.44***
<b>Site X dose N</b>	<b>0.16</b>	<b>0.48</b>	<b>3.95*</b>	<b>2.79</b>
N lin	18.92***	29.83***	20.58***	29.54***
N qua	0.67	5.90*	8.14**	5.29*
N cub	0.04	1.01	4.22 <sup>t</sup>	0.34
LSD protégé (0.05)	0.5447	18.1950	2.1585	0.11
<b>2015 2 sites coupe 1 et 2</b>	<b>Rendement (coupe1 + 2)</b>	<b>Prélèvement en N (coupe 1 + 2)</b>	<b>Teneur en N total (coupe2)</b>	<b>INA (coupe2)</b>
Site	0.02	0.00	0.37	2.18
Dose N	7.40***	11.62***	1.60	0.71
<b>Site X dose N</b>	<b>0.83</b>	<b>1.17</b>	<b>1.12</b>	<b>0.71</b>
N lin	27.18***	39.04***	4.59*	1.62
N qua	1.34	5.95*	0.93	0.28
N cub	0.01	0.52	1.52	0.42
LSD protégé (0.05)	0.6819	18.6331	NS	NS
<b>2015 2 sites coupe 1, 2 et 3</b>	<b>Rendement (coupe1 + 2 + 3)</b>	<b>Prélèvement en N (coupe1 + 2 + 3)</b>	<b>Teneur en N total (coupe3)</b>	<b>INA (coupe3)</b>
Site	9.08*	2.67	0.91	8.35*
Dose N	6.24**	21.34***	8.67***	4.71**
<b>Site X dose N</b>	<b>0.87</b>	<b>4.67*</b>	<b>3.06*</b>	<b>1.33</b>
N lin	24.21***	77.48***	13.09**	4.15 <sup>t</sup>
N qua	0.10	0.15	0.12	0.17
N cub	0.09	0.09	0.17	10.56**
LSD protégé (0.05)	0.8454	16.9296	1.7941	0.07

143

\*\*\*, \*\*, \* et <sup>t</sup> significatif à P < 0.001, 0.01, 0.05, 0.10  
 Utilisation de l'indice de nutrition azoté pour optimiser la fertilisation dans le maïs fourrager et les prairies de graminées

<b>2016 4 sites coupe 1</b>	<b>Rendement (coupe 1)</b>	<b>Prélèvement en N (coupe 1)</b>	<b>Teneur en N total (coupe 1)</b>	<b>INA (coupe 1)</b>
Site	26.53***	37.83***	31.20***	42.83***
Dose N	10.26***	25.26***	17.24***	24.07***
<b>Site X dose N</b>	<b>0.81</b>	<b>1.58<sup>t</sup></b>	<b>1.62<sup>t</sup></b>	<b>1.75<sup>*</sup></b>
N lin	46.50***	116.22***	80.24***	40.89***
N qua	2.30	1.55	1.15	0.71
N cub	0.04	0.41	0.64	1.06
LSD protégé (0.05)	0.27	7.60	1.02	0.04
<b>2016 4 sites coupe 1 et 2</b>	<b>Rendement (coupes 1 + 2)</b>	<b>Prélèvement en N (coupe 1 + 2)</b>	<b>Teneur en N total (coupe 2)</b>	<b>INA (coupe 2)</b>
Site	37.72***	23.08***	4.69*	3.92t
Dose N	27.91***	39.00***	6.06***	19.44***
<b>Site X dose N</b>	<b>1.26</b>	<b>1.37</b>	<b>0.77</b>	<b>0.59</b>
N lin	167.35***	251.43***	34.57***	20.34***
N qua	6.11*	0.80	2.67	0.11
N cub	0.54	0.09	0.05	0.02
LSD protégé (0.05)	0.47	14.80	1.98	0.06
<b>2016 4 sites coupe 1, 2 et 3</b>	<b>Rendement (coupe 1 + 2 + 3)</b>	<b>Prélèvement en N (coupe 1 + 2 + 3)</b>	<b>Teneur en N total (coupe 3)</b>	<b>INA (coupe 3)</b>
Site	25.71***	11.67**	5.82*	3.92t
Dose N	27.61***	31.76***	6.65***	19.44***
<b>Site X dose N</b>	<b>1.53<sup>t</sup></b>	<b>1.20</b>	<b>0.87</b>	<b>0.59</b>
N lin	217.59***	270.60***	36.63***	20.34***
N qua	12.11***	1.22	11.61***	0.11
N cub	1.08	0.32	0.60	0.02
LSD protégé (0.05)	0.60	20.87	2.01	0.06

\*\*\*, \*\*, \*, t : significatif à P< 0.001, 0.01, 0.05, 0.10

<b>2017 coupe 1</b>	<b>Rendement (coupe 1)</b>	<b>Prélèvement en N (coupe 1)</b>	<b>Teneur en N total (coupe 1)</b>	<b>INA (coupe 1)</b>
Site	16.02**	13.38**	54.04***	8.69**
Dose N	7.54***	26.20***	17.61***	26.75***
<b>Site X dose N</b>	<b>1.59t</b>	<b>0.66</b>	<b>0.99</b>	<b>1.17</b>
N lin	30.87***	154.18***	100.33***	156.07***
N qua	20.60***	9.54**	0.12	2.44
N cub	4.48*	0.70	0.30	0.85
LSD protégé (0.05)	0.32	8.32	1.33	0.05
<b>2017 coupe 1 et 2</b>	<b>Rendement (coupes 1 + 2)</b>	<b>Prélèvement en N (coupe 1 + 2)</b>	<b>Teneur en N total (coupe 2)</b>	<b>INA (coupe 2)</b>
Site	4.59*	26.43***	174.13***	20.68***
Dose N	20.09***	30.54***	5.55***	14.81***
<b>Site X dose N</b>	<b>1.87*</b>	<b>1.15</b>	<b>1.18</b>	<b>1.44</b>
N lin	113.37***	228.40***	42.51***	113.87***
N qua	44.03***	10.51**	0.32	1.82
N cub	4.99*	1.19	0.00	0.68
LSD protégé (0.05)	0.5099	16.86	2.14	0.07
<b>2017 coupe 1, 2 et 3</b>	<b>Rendement (coupe 1 + 2 + 3)</b>	<b>Prélèvement en N (coupe 1 + 2 + 3)</b>	<b>Teneur en N total (coupe 3)</b>	<b>INA (coupe 3)</b>
Site	53.28***	21.05**	56.99***	0.12
Dose N	14.33***	17.69***	3.82***	5.45***
<b>Site X dose N</b>	<b>1.73t</b>	<b>0.90</b>	<b>2.04*</b>	<b>1.31</b>
N lin	41.23***	33.53***	1.39	8.10**
N qua	0.30	3.15t	5.56*	2.16
N cub	0.13	0.10	0.49	0.30
LSD protégé (0.05)	0.73	28.64	2.67	0.09

\*\*\*, \*\*, \*, t : significatif à P< 0.001, 0.01, 0.05, 0.10

## Annexe 6 Analyses statistiques dans le maïs

Valeurs de F et niveaux de signification pour le rendement, le prélèvement en N et la teneur en N total suite à l'application de différentes doses de N en post-levée.

<b>2015 2 sites (sans fumier)</b>	<b>Rendement ensilage</b>	<b>Teneur en N total ensilage</b>	<b>Prélèvement en N à la récolte</b>
Site	2.98	57.01***	4.90 <sup>t</sup>
Dose N	3.93*	3.50*	42.52***
<b>Site X dose N</b>	<b>1.14</b>	<b>2.26<sup>t</sup></b>	<b>1.59</b>
N lin	13.14**	8.86*	166.94***
N qua	0.02	4.84*	0.80
N cub	0.01	0.17	0.01
LSD protégé (0.05)	2.20	0.7259	29.4229
<b>2016 3 sites (St Isidore exclus)</b>	<b>Rendement ensilage</b>	<b>Teneur en N total ensilage</b>	<b>Prélèvement en N à la récolte</b>
Site	10.72**	2.75 <sup>t</sup>	10.84**
Dose N	1.09	3.09*	2.02 <sup>t</sup>
<b>Site X dose N</b>	<b>0.29</b>	<b>0.73</b>	<b>0.39</b>
N lin	1.28	0.80	0.19
N qua	0.01	5.14*	0.15
N cub	0.42	0.00	0.22
LSD protégé (0.05)	NS	1.80	NS
<b>2017 4 sites (sans fumier au printemps)</b>	<b>Rendement ensilage</b>	<b>Teneur en N total ensilage</b>	<b>Prélèvement en N à la récolte</b>
Site	7.31**	0.04	4.99*
Dose N	0.70	10.96***	4.69**
<b>Site X dose N</b>	<b>0.86</b>	<b>3.32**</b>	<b>1.87<sup>t</sup></b>
N lin	0.88	33.67***	11.7**
N qua	1.21	3.90 <sup>t</sup>	3.50 <sup>t</sup>
N cub	0.71	5.59*	3.39 <sup>t</sup>
LSD protégé (0.05)	NS	0.68	19.35