

**Performance des fertilisants à libération contrôlée et d'origine organique dans
la fraise à jours neutres fertiguée.**

Rapport Final

Projet n° PSIH10-1-355



Rédigé par

Christine Landry, agr., Ph.D. – IRDA
Carl Boivin, agr., M.Sc. – IRDA

Avec la collaboration de

Luc Belzile, agr., M.Sc. – IRDA
Paul Deschênes, agr., M.Sc. – IRDA
Julie Mainguy, agr. – IRDA
Stéphane Nadon, t.a. – IRDA
Danièle Pagé, t.a. – IRDA
Laurence Simard-Dupuis, agr. – IRDA
Daniel Bergeron, agr., M.Sc. – MAPAQ
Stéphanie Tellier, agr., M.Sc. – MAPAQ
Serge Gagnon, agr., M.Sc. – Plant-Prod Québec.

31 janvier 2012

Équipe de réalisation

Christine Landry	Chercheure, IRDA
Carl Boivin	Chercheur, IRDA
Luc Belzile	Chercheur, IRDA
Paul Deschênes	Professionnel de recherche, IRDA
Julie Mainguy	Attachée de recherche, IRDA
Laurence Simard-Dupuis	Attachée de recherche, IRDA
Danièle Pagé	Technicienne agricole, IRDA
Stéphane Nadon	Technicien agricole, IRDA
Michèle Grenier	Statisticienne, IRDA
Daniel Bergeron	Conseiller en horticulture, MAPAQ DRCN
Stéphanie Tellier	Conseillère en horticulture, MAPAQ DRCN
Serge Gagnon	Représentant technique, Plant-Prod Québec
Félix Primeau-Bureau	Étudiant d'été en génie agroenvironnemental
Étienne Rousseau	Étudiant d'été en génie agroenvironnemental
Jessica Dagenais	Étudiante d'été en biologie
Marc-Antoine Robert	Étudiant d'été en agronomie
Rosemary Allen	Étudiante d'été en agronomie
Noélie Hébert Tardif	Étudiante d'été en biologie
Bruno Lavallée	Étudiant d'été en agronomie
Héloïse Bastien	Étudiante d'été en génie agroenvironnemental
Jean-François Plourde	Étudiant d'été en agronomie
Julien Vachon	Étudiant au CÉGEP

TABLE DES MATIÈRES

1	RÉSUMÉ	7
2	DESCRIPTION DU PROJET	8
2.1	INTRODUCTION.....	8
2.2	OBJECTIF GÉNÉRAL.....	9
2.3	OBJECTIFS SECONDAIRES.....	9
3	MATÉRIEL ET MÉTHODE	10
3.1	SITE EXPÉRIMENTAL.....	10
2.1	TRAITEMENTS.....	13
3.2	DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET ANALYSES STATISTIQUES.....	14
2.2	COLLECTE DES DONNÉES.....	16
3.2.1	<i>Analyses physiques et chimiques de sol</i>	16
3.2.2	<i>Développement et nutrition des plants</i>	18
3.2.3	<i>Conditions météorologiques</i>	19
3.2.4	<i>Suivi de la tension de l'eau et de la température du sol</i>	20
3.2.5	<i>Récolte</i>	20
4	RÉSULTATS ET ANALYSE	21
4.1	DÉVELOPPEMENT ET NUTRITION DES PLANTS.....	21
4.1.1	<i>Rendements en fraises</i>	30
4.2	ÉLÉMENTS NUTRITIFS ET ACTIVITÉ BIOLOGIQUE DU SOL.....	35
4.2.1	<i>Contenus en éléments nutritifs du sol dans la butte en saison</i>	35
4.2.2	<i>Flux in situ de N-NO₃ et N-NH₄ dans la butte au cours de la saison</i>	37
4.2.3	<i>Activité biologique du sol dans la butte en saison</i>	41
4.3	AZOTE RÉSIDUEL DU SOL.....	41
4.3.1	<i>Contenu en N_{tot} du sol dans la butte en post-récolte</i>	41
4.3.2	<i>Répartition des teneurs en nitrates dans la butte de sol en post-récolte</i>	43
4.4	ANALYSE ÉCONOMIQUE.....	48
5	CONCLUSION	50
6	DIFFUSION DES RÉSULTATS	52
7	REMERCIEMENTS	53
8	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	53

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Site d'essai, Saint-Laurent, Ile-d'Orléans, été 2010.	10
Figure 2. Membrane d'échange ionique.	12
Figure 3. Positionnement des MEI dans la butte de sol.	12
Figure 4. Schéma du dispositif expérimental.	15
Figure 5. Coupe transversale d'une butte et découpage des 14 sous-sections (cubes).	17
Figure 6. Répartition des 14 cubes découpés dans la tranche de sol prélevée dans la butte.	17
Figure 7. Installation des thermocouples peu de temps après la plantation, avant la reconstruction de la butte.	20
Figure 8. Évolution de la masse sèche moyenne des plants de fraisiers en cours de saison, été 2010 et 2011.	22
Figure 9. Évolution du prélèvement moyen en N_{tot} des fraisiers en cours de saison, été 2010.	23
Figure 10. Évolution du prélèvement moyen en N_{tot} des fraisiers en cours de saison, été 2011.	23
Figure 11. Exportations de N_{tot} par les récoltes successives de fraises selon le type d'engrais et la dose de N fertilisé, été 2010.	25
Figure 12. Évolution par période des exportations de N_{tot} par les récoltes successives de fraises selon la dose de N fertilisé, été 2010.	26
Figure 13. Évolution par période des exportations de N_{tot} par les récoltes successives de fraises selon la dose de N fertilisé, été 2011.	27
Figure 14. Contenus en N total dans les folioles de fraisiers en cours de saison selon le type d'engrais de départ et la dose de fertigation, été 2010.	29
Figure 15. Teneurs en N_{tot} dans les folioles de fraisiers en cours de saison selon le type d'engrais de départ et la dose de fertigation, été 2011.	29
Figure 16. Nombre moyen de nouvelles feuilles par fraisier selon le type d'engrais incorporé au buttage en 2010 et 2011.	30
Figure 17. Nombre moyen de nouvelles cymes (inflorescences) par fraisier selon le type d'engrais incorporé au buttage en 2010 et 2011.	31
Figure 18. Rendement total relatif en fruits (poids) selon la période en 2010, tous traitements confondus.	32
Figure 19. Rendement total relatif en fruits (poids) selon la période en 2011, tous traitements confondus.	32
Figure 20. Rendement total relatif en fruits (poids) selon le type d'engrais à l'implantation et la dose de N appliqué par fertigation en 2010.	33
Figure 21. Rendement total relatif en fruits (nombre) selon le type d'engrais à l'implantation et la dose de N appliqué par fertigation en 2010.	34
Figure 22. Rendement total relatif en fruits (poids) selon le type d'engrais à l'implantation et la dose de N appliqué par fertigation en 2011.	35
Figure 23. Contenus en nitrates du sol des buttes (méthode SSE) selon le type d'engrais de départ en saison, été 2010.	36
Figure 24. Contenus en nitrates du sol des buttes (méthode SSE) selon le type d'engrais de départ en saison, été 2011.	36
Figure 25. Flux <i>in situ</i> de $N-NO_3$ dans la strate utile de sol en cours de saison, été 2010.	39
Figure 26. Flux <i>in situ</i> de $N-NO_3$ dans la strate utile de sol en cours de saison, été 2011.	39
Figure 27. Contenu automnal post-récolte en N_{tot} de la strate de sol 0-30 cm selon le type d'engrais de départ et la dose fertilisée de N, saison 2010.	42

Figure 28. Contenu automnal post-récolte en N_{tot} de la strate de sol 0-30 cm selon le type d'engrais de départ et la dose fertiliguée de N, saison 2011.	42
Figure 29. Répartition des teneurs en $N\text{-NO}_3$ dans la butte de sol à l'automne selon le type d'engrais de départ et la dose de N fertiligué, saison 2010.	44
Figure 30. Répartition des teneurs en $N\text{-NO}_3$ dans la butte de sol à l'automne selon le type d'engrais de départ et la dose de N fertiligué, saison 2011. Le traitement LCN100 n'a pu être analysé.	45
Figure 31. Nombre de jours cumulés où la température a atteint au moins 19°C dans le sol selon les zones de butte, saison 2011. N.B. Une pente de zéro signifie qu'il n'y a plus d'accumulation de jours à la température ciblée.	46
Figure 32. Hypothèse de placement en bande des engrais dans les buttes de culture de la fraise fertiliguée à jours neutres.	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractérisation du sol au site d'étude, été 2010.	11
Tableau 2. Dates d'implantation et des principales opérations culturales au cours des deux années de l'étude.	13
Tableau 3. Résumé des traitements de fertilisation à l'implantation et de fertigation en saison. .	14
Tableau 4. Dates des divers échantillonnages de sol, de végétaux et du remplacement périodique des MEI au cours des deux années d'étude.	16
Tableau 5. Calendrier des récoltes bihebdomadaires de fruits pour les saisons 2010 et 2011.	21
Tableau 6. Estimés des prélèvements et exportations de N par la culture, saisons 2010 et 2011.	24
Tableau 7. Analyses statistiques de l'impact du type d'engrais et des doses fertiguées de N sur les flux de N-NO ₃ , été 2010 et 2011.	40

1 RÉSUMÉ

Ce projet s'articule autour de l'hypothèse suivante, à savoir que recourir à des engrais à libération contrôlée ou d'origine organique au buttage, en remplacement des engrais conventionnels, permettrait de réduire ou même d'éliminer la part d'azote apporté par la fertigation dans un programme de fertilisation. Cette étude démontre d'abord que les apports de N en saison par la fertigation haussent et maintiennent efficacement la disponibilité de cet élément dans le sol. Toutefois, les bénéfices conséquents à cette situation varient selon la saison et le type d'engrais utilisé au buttage. En 2010, les gains retirés de la fertigation azotée se sont avérés différents selon la dose de N apportée (0, 50 ou 100 % de la dose recommandée en N) et le type d'engrais utilisé au buttage (conventionnel, libération contrôlée ou organique). Ainsi, les apports de N par la fertigation ont favorisé des rendements supérieurs, lorsque combinés avec l'engrais conventionnel. Toutefois, il n'y a pas eu de gain à fertiguer avec la dose N de 100%, puisque des rendements équivalents ont été obtenus avec la dose réduite de moitié. Par ailleurs, la fertigation n'a eu aucun impact, lorsque combinée avec l'engrais organique. Enfin, les apports en N fertigué ont même nui aux rendements des fraisiers fertilisés avec l'engrais à libération contrôlée. Ainsi, ce sont les plants non fertigués qui ont donné les meilleurs rendements, par ailleurs comparables à ceux obtenus avec l'engrais conventionnel fertigué. En 2011, il n'y a pas eu de gain à fertiguer, et ce, peu importe le type d'engrais utilisé au buttage. De plus, les rendements étaient semblables entre les différentes combinaisons de fertilisation. Un ou des facteurs limitatifs semblent donc avoir eu un impact plus fort sur les rendements que celui de la fertilisation. Finalement, à savoir s'il est envisageable agronomiquement de diminuer ou d'éliminer les apports de N par la fertigation, la saison 2010 nous indique que oui. De plus, avec l'utilisation de l'engrais à libération contrôlée, pour des rendements en fruits comparables, l'analyse coûts/bénéfices conclut que la fertigation n'offre pas de perspective de rentabilité significative pour les producteurs, considérant les gains potentiels liés à la simplification de la fertilisation. Ceci est d'autant plus vrai si l'on ajoute les gains environnementaux potentiels à ne pas fertiguer, puisque ce projet a démontré que la fertigation résultait en des quantités de N résiduel plus élevées dans la butte. Toutefois, dans le cas où l'emploi de l'engrais à libération contrôlée serait choisi, son application en bandes, dans la zone de butte offrant le meilleur compromis entre l'atteinte des températures, la disponibilité en eau et le développement racinaire, serait à privilégier afin de maximiser les bénéfices pouvant être obtenus de cette technologie.

2 DESCRIPTION DU PROJET

2.1 Introduction

L'azote (N) est un élément essentiel du rendement des cultures et le fraisier ne fait pas exception. Un apport suffisant, répondant aux besoins du fraisier, doit donc être assuré pour l'ensemble de la période présentant des besoins azotés. Dans le cas précis du fraisier à jours neutres, cette période est très longue, puisque ce dernier produit des fruits de juin à octobre. Cette situation crée une problématique particulière vis-à-vis du N puisque cet élément, sous sa forme nitrate, ne peut se fixer aux particules de sol. Ainsi, le N est très mobile dans le sol. De plus, cet élément est transporté par le mouvement de l'eau ('mass flow'), ce qui le rend encore plus susceptible au lessivage, particulièrement en conditions irriguées. L'apport progressif de N via le système d'irrigation a donc été envisagé par les producteurs afin de maximiser le prélèvement du N par les fraisiers avant son lessivage. La fertilisation usuelle dans la fraise à jours neutres consiste ainsi à appliquer environ 30 % des fertilisants azotés sous forme granulaire à l'implantation et à combler les besoins en cours de saison via l'apport de N par fertigation. Il demeure toutefois qu'une partie significative de ce qui est apportée au sol au printemps peut être lessivée avant que la culture en bénéficie. En effet, cette partie de fertilisant est soumise, sur une longue période, aux apports fréquents en eau par l'irrigation. Elle peut aussi être affectée par les excès d'eau qui peuvent survenir lors de saisons pluvieuses ou d'apports excessifs d'eau qui, tous, accentuent les risques de lessivage du N. Par ailleurs, pour ce qui est de la partie fertiguée de N, l'apport conjoint de l'eau et des fertilisants peut aussi contribuer à hausser les risques de lessivage de l'engrais. D'autant plus que les engrais utilisés pour fertiguer sont, par définition, hautement solubles. Conséquemment, afin de réduire les importants coûts de production reliés à la fertigation, que ce soit en terme de temps ou de prix des engrais, et de minimiser l'impact environnemental, ce secteur de production doit innover afin d'augmenter l'efficacité d'utilisation des fertilisants azotés.

Une des avenues possibles pour y parvenir se présente avec l'utilisation des nouveaux engrais à libération contrôlée (ELC), libérant graduellement le N qu'ils contiennent. Cette libération progressive permet d'optimiser la contribution azotée de départ en minimisant les risques de pertes. Ces engrais sont déjà utilisés en Californie et en Floride. Toutefois, il n'existe présentement aucun résultat public d'essais québécois sur l'utilisation de ces engrais. Les producteurs du Québec se questionnent donc sur l'efficacité de ces fertilisants sous les conditions du Québec, d'autant plus que la libération du N de ces produits est tributaire de la température du sol. Dans un même ordre d'idée, il serait aussi intéressant de tester le potentiel des engrais organiques qui sont, de par leur nature, une source d'engrais à libération graduelle, puisqu'une part des éléments doit d'abord être minéralisée par les microorganismes du sol pour devenir disponible à la plante. Cette avenue, tout en permettant de valoriser les biomasses produites régionalement, pourrait être une solution intéressante de remplacement. Cependant, là encore, aucun résultat d'étude publique menée sous les conditions culturales québécoises n'est disponible.

2.2 Objectif général

Ce projet vise à comparer le potentiel d'utilisation d'engrais à libération contrôlée et d'origine organique dans la culture de la fraise à jours neutres fertiguée, en conditions culturales québécoises, afin de réduire la proportion des engrais apportés par fertigation et ainsi diminuer les coûts de production reliés à la fertilisation.

2.3 Objectifs secondaires

- Acquérir de nouvelles connaissances au sujet de l'influence de la fertilisation sur le développement, la nutrition et le rendement en fruits du fraisier à jours neutres;
- Justifier les apports en azote conséquents aux épisodes de fertigation effectués durant la saison;
- Vérifier si l'utilisation d'engrais à libération contrôlée comme unique apport d'azote au sol à l'implantation permet de réduire, voire même d'éliminer les épisodes de fertigation;
- Étudier le potentiel d'utilisation des engrais d'origine organique pour la nutrition du fraisier à jours neutres et vérifier si les résultats obtenus avec ces derniers sont comparables à ceux obtenus avec les engrais de synthèse à libération contrôlée.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1 Site expérimental

Cette étude a été réalisée à la Ferme François Gosselin, dans un champ en production commerciale, localisée à Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans (Québec) (Figure 1) Elle s'est échelonnée sur deux ans, du printemps 2010 à l'automne 2011. Le sol était un loam argileux, contenant +/- 30 % de gravier (particules au diamètre supérieur à 2 mm), dont les caractéristiques sont résumées au Tableau 1. Les engrais de départ ont été appliqués à la volée, à la main, puis incorporés juste avant la formation des buttes. Les fraisiers du cultivar Seascape ont été implantés en quinconces sur la butte en rangs doubles à une densité de plantation de 54 362 fraisiers ha⁻¹ pour les deux années.



Figure 1. Site d'essai, Saint-Laurent, Ile-d'Orléans, été 2010.

Tableau 1. Caractérisation du sol au site d'étude, été 2010.

Paramètres	Valeurs
pH _{eau}	6,8
Matière organique (MO) (%)	3,9
N-NH ₄ (mg kg ⁻¹ b.s.)	2,6
N-NO ₃ (mg kg ⁻¹ b.s.)	4,3
N _{tot} (%)	0,16
C/N	14
Éléments Mehlich-3 (kg ha ⁻¹ b.s.)	
P	276
K	585
Ca	6086
Mg	375
Al	2398
P/Al (%)	11,4

Le système d'irrigation par goutte-à-goutte a été installé mécaniquement lors de la formation des buttes et la pose du paillis de polyéthylène noir. Le travail a été effectué avec l'équipement standard du producteur. Quoique le dispositif fasse partie intégrante du champ de l'entreprise, l'irrigation et la fertigation de chacune des parcelles du dispositif ont été effectuées indépendamment de celles du producteur. Pour ce faire, un système parallèle de tuyaux et de valves était relié à une pompe indépendante et à des réservoirs gérés de façon autonome. De plus, chacune des parcelles a été équipée d'un tensiomètre afin de pouvoir irriguer individuellement les parcelles selon leurs besoins en eau. Toutefois, la même consigne de déclenchement du système d'irrigation a été utilisée pour toutes les parcelles. Il est à noter que le volume d'eau appliqué lors d'une fertigation était le même, incluant les témoins non fertigués en N. Les caractéristiques du système d'irrigation utilisé sont les suivantes :

- ❑ Diamètre intérieur du tube : 16 mm;
- ❑ Espacement entre 2 goutteurs : 30 cm;
- ❑ Débit d'un goutteur à 83 kPa (12 psi) : 0,017 litre par minute.

Une fois le buttage finalisé, trois paires de membranes d'échange ionique (MEI) ont été installées dans chacune des parcelles. Chacune des paires était constituée d'une membrane anionique pour capter le N-NO₃ (AR204-SZRA, Ionics Inc., Watertown, MA) et d'une membrane cationique pour capter le N-NH₄ (CR67-HMR, Ionics Inc., Watertown, MA). Les MEI sont de petites plaquettes faites de vinyle qui contiennent des groupements chargés, saturés d'un contre-ion (Figure 2). Ce contre-ion est relâché dans le sol en échange des ions ciblés pour lesquels les groupements possèdent une affinité beaucoup plus grande. Ceci assure la sorption *in situ*, en continu, des ions ciblés par l'étude et leur retenue sur les MEI jusqu'à ce que celles-ci soit récupérées au champ et que les ions soient extraits au laboratoire. Les MEI, mesurant 5,4 x 2,4 cm, ont été insérées verticalement dans la couche utile de sol de façon à couvrir du 10^e au 15^e cm de profondeur dans la butte (Figure 3). Les MEI ont ainsi été laissées au champ pour cinq périodes consécutives de quelques semaines, délimitées par des prises de mesure cible. Elles étaient échangées pour des nouvelles à chacune des périodes. Les flux de N (NO₃⁻ et NH₄⁺) sont donc exprimés par unité de surface de MEI par période de contact (µg cm⁻² période⁻¹).

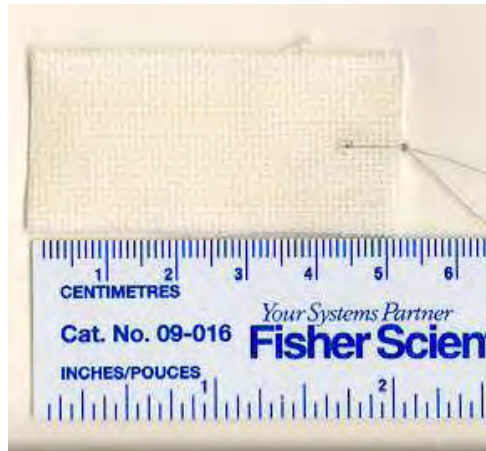


Figure 2. Membrane d'échange ionique.

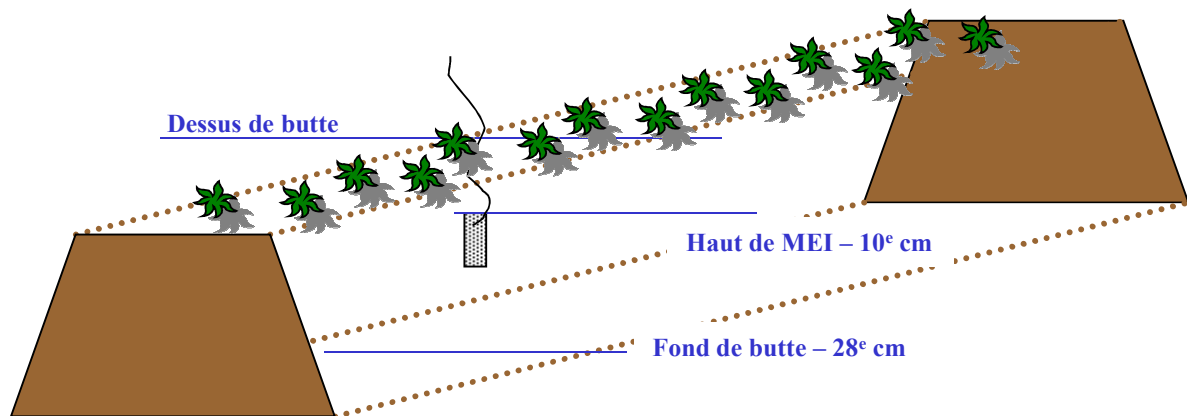


Figure 3. Positionnement des MEI dans la butte de sol.

Enfin, tout au long de l'étude, la régie de production et les traitements phytosanitaires étaient sous la responsabilité du producteur, exception faite de la régie d'irrigation et de celle de la fertilisation. Les dates d'implantation et des principales opérations culturales pour les deux années sont résumées au Tableau 2.

Tableau 2. Dates d'implantation et des principales opérations culturales au cours des deux années de l'étude.

Opérations	Années	
	2010	2011
Application des engrais au printemps (N, P, K)	29 avril	10 mai
Buttage et plantation	29 avril	10 mai
Pose des membranes d'échange ioniques	12 mai	18 mai
Début de la fertigation N	18 juin	14 juin
Début des récoltes	23 juin	15 juillet
Changement de dose de la fertigation N	15 juillet	21 juillet
Fin de la fertigation	13 septembre	30 septembre
Dernière récolte	8 octobre	11 octobre
Démantèlement du dispositif et prélèvement des sols post-récolte	14 octobre	13 octobre

2.1 Traitements

La présente étude comparait neuf traitements, incluant trois différents types d'engrais de départ, conjugués à trois différentes doses de N appliqué par fertigation en saison. Dans le cas des engrais d'implantation, des quantités les plus égales possible de N, P et K disponibles ont été apportées afin que le type d'engrais soit le facteur testé et non la disponibilité des éléments fertilisants. Les quantités visées ont été basées, selon l'analyse de sol du producteur, sur les recommandations d'apports d'engrais du champ utilisé. Ainsi, la totalité du phosphore (P) a été apportée à l'implantation au taux de 21, 24 et 21 kg P₂O₅ ha⁻¹ pour les engrais ACERnt, Acti-sol et 27-0-0, respectivement. Pour le N et le potassium (K), des doses d'implantation identiques pour tous les types d'engrais, de 50 kg N ha⁻¹ et 30 kg K₂O ha⁻¹ ont été appliquées. Par la suite, des doses complémentaires de N et K₂O étaient apportées par fertigation. Ces doses équivalaient à 0 % (eau seulement), 50 % et 100 % de la dose recommandée. En cours de saison, elles étaient ajustées à une reprise. Ainsi, une formulation plus élevée en N était utilisée au départ, suivie d'une seconde contenant une dose réduite en N. Quoiqu'il en soit, la dose à 50 % représentait toujours la moitié de la dose à 100 %. En 2010, la dose 100 % de N était de 6,7 et 4,5 kg N ha⁻¹ pour les trois premières semaines et les huit suivantes, respectivement. En 2011, la dose 100 % de N était de 6,7 et 4,5 kg N ha⁻¹ pour les cinq premières semaines et les huit suivantes, respectivement. Ainsi, la fertilisation totale en N était de 106 kg N ha⁻¹ en 2010 et de 120 kg N ha⁻¹ en 2011. Dans le cas du K₂O, celle-ci était de 4,4 kg ha⁻¹ par semaine pour l'ensemble de la production. Le Tableau 3 résume les divers traitements testés de fertilisation.

Tableau 3. Résumé des traitements de fertilisation à l'implantation et de fertigation en saison.

Engrais d'implantation	Fertigation	Symbole
Granulaire conventionnel 27-0-0	0 % (eau)	CVN0
	50 % de la dose recommandée	CVN50
	100 % de la dose recommandée	CVN100
Organique Acti-sol à base de fumier granulé de poulets	0 % (eau)	FPN0
	50 % de la dose recommandée	FPN50
	100 % de la dose recommandée	FPN100
Libération contrôlée ACERnt (120 jours de libération à 21°C)	0 % (eau)	LCN0
	50 % de la dose recommandée	LCN50
	100 % de la dose recommandée	LCN100

3.2 Dispositif expérimental et analyses statistiques

Pour cette expérience, un dispositif en tiroirs subdivisés (*split-plot*) constitué de trois blocs de trois grandes parcelles comprenant chacune trois sous parcelles a été établi, pour un total de 27 parcelles (Figure 4). Les trois types de fertilisants de départ ont été assignés aux parcelles principales, tandis que les trois doses d'apports en N par la fertigation ont été attribuées aux sous-parcelles. Pour la plupart des variables, des mesures ont été prises à différentes dates pendant la saison. Les variables de rendement ont été cumulées par période bihebdomadaire et pour la saison complète. Les analyses des variables mesurées ont été effectuées séparément pour les années 2010 et 2011 à l'aide de la procédure MIXED de SAS (Littell et coll., 2006). Un modèle mixte normal a été ajusté pour chacune des variables réponses. Les effets fixes du modèle étaient le type de fertilisant, la dose de N, la période bihebdomadaire et toutes les interactions entre ces trois facteurs. L'effet aléatoire des blocs, l'interaction bloc×fertilisant et l'interaction bloc×fertilisant×doseN ont également été inclus dans le modèle. Les corrélations entre les mesures répétées et les périodes bihebdomadaires ont été modélisées. Pour chacune des variables réponses, le choix de la structure des corrélations parmi les structures disponibles avec la procédure MIXED a été basé sur le critère AIC (critère d'information d'Akaike). Pour les variables où les mesures n'ont été effectuées qu'une seule fois et pour l'analyse des rendements cumulatifs de toute la saison, les effets faisant intervenir la période n'étaient pas présents dans le modèle. Pour les variables autres que celles du rendement qui ont aussi été mesurées à plusieurs dates, l'analyse a été faite de la même façon que celle des rendements bihebdomadaires. Les hypothèses d'homogénéité des variances et de normalité de la distribution des erreurs ont été vérifiées au moyen de graphiques de résidus. Pour certaines variables analysées, l'option GROUP=TRAIT a dû être utilisée pour ajuster une variance différente pour chaque traitement. Dans d'autres cas, une transformation LOG a été appliquée. Quelques rares données extrêmes ont été identifiées et retirées du jeu de données.

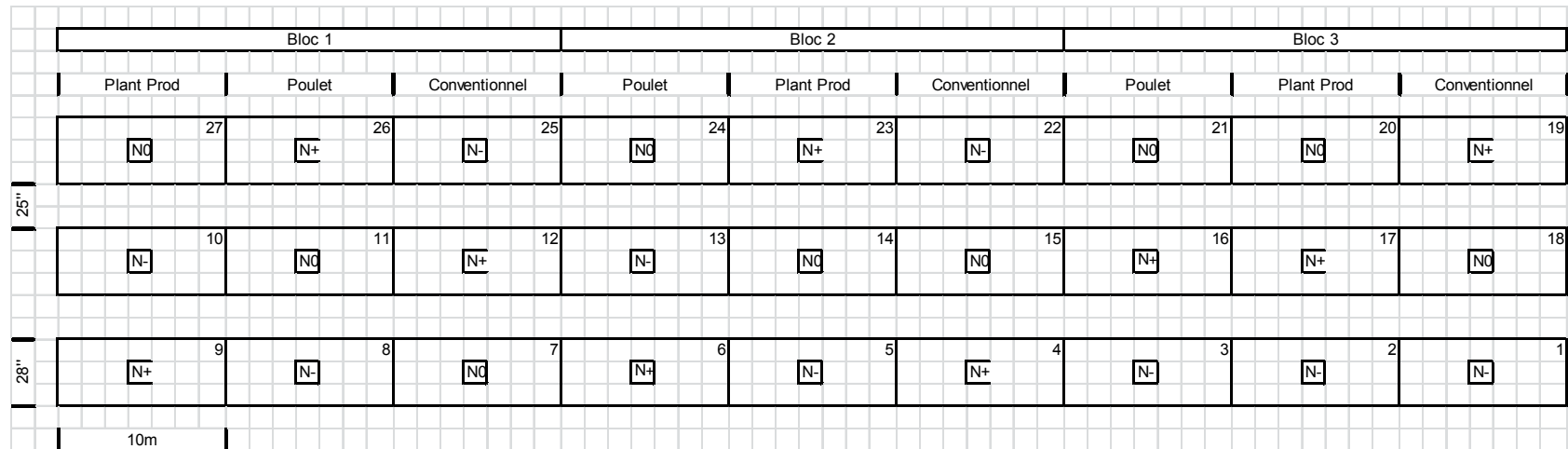


Figure 4. Schéma du dispositif expérimental.

2.2 Collecte des données

Tout au long du projet, divers échantillonnages de sol et de végétaux ont été effectués, en plus du remplacement périodique des MEI. La répartition de ces activités dans le temps, dont la méthodologie est décrite dans les sections subséquentes, est résumée au Tableau 4.

Tableau 4. Dates des divers échantillonnages de sol, de végétaux et du remplacement périodique des MEI au cours des deux années d'étude.

		Dates								
2010 :		29 avril	12 mai	17 juin	15 juil.	17 août	23 août	30 août	13 sept.	11 oct.
2011 :		10 mai	18 mai	13 juin	15 juil.	18 août	18 août	30 août	22 sept.	12 oct.
		Sol carac.							Sol N	
Activités [†]		Sol biologie			Sol SSE		Sol SSE			
		Feuille		Feuille		Feuille		Feuille		
		Plant		Plant		Plant		Plant		Plant
				Fruit 1 ^{er}				Fruit 2 ^e		Fruit 3 ^e
		MEI 1 ^{er}	MEI 2e	MEI 3e			MEI 4e	MEI 5e		

[†]Sol N, dosage du NO₃ et N total; sol biologie, incubation des sols pour le dosage du CO₂ et de l'uréase; SSE, extraction de sol saturé à l'eau pour le dosage de NH₄ et NO₃; feuille, dosage des éléments majeurs et mineurs; plant, masse sèche et dosage du N_{tot} (sauf échantillonnage de septembre); fruit, dosage du N_{tot}; MEI, membranes d'échange ionique.

3.2.1 Analyses physiques et chimiques de sol

Les analyses de sol ont été réalisées sur des échantillons composites. Au printemps, un premier échantillonnage de sol était effectué par bloc pour faire la caractérisation physico-chimique de la strate 0-20 cm de sol (Tableau 1). Par la suite, à deux reprises pendant la saison des échantillons de sol ont été prélevés dans chacune des parcelles, sur la butte, au travers du paillis de plastique. Six sous-échantillons ont été pris par parcelle. Étant donné que la strate de sol utile était visée, seul le sol du 5^e au 20^e cm a été conservé pour analyse. Les perforations dans le paillis de plastique ont été réparées après chacun des échantillonnages. Aux deux dates, le sol a été analysé pour faire le suivi du N-NH₄ et du N-NO₃ disponibles par extraction de sol saturé à l'eau (SSE) afin de s'approcher des méthodes utilisées en production commerciale. À la mi-juillet, date à laquelle se produit habituellement le pic de minéralisation dans les sols, le taux respiratoire des sols et leur taux d'activité uréase ont aussi été dosés.

En automne, lors du démantèlement du dispositif suivant la dernière récolte, un dernier échantillonnage de sol de la strate 0-28 cm a été récupéré sur la butte afin de doser le N résiduel global. Une coupe transversale de butte a aussi été effectuée afin d'étudier plus en détail la répartition du N dans la butte. Pour ce faire, une « trancheuse » de sol a été fabriquée avec deux plaques d'acier maintenues à 10 cm l'une de l'autre à l'aide de blocs de bois. La largeur des plaques était de 76,20 cm, soit la largeur d'une butte de sol, alors que la hauteur servant à l'échantillonnage était de 30,48 cm. Positionnée au-dessus d'un fraiser, préalablement coupé au

ras du sol, la « trancheuse » était enfoncée dans la butte de sol à l'aide de coups de masse. Par la suite, le pourtour de la trancheuse était déterré et celle-ci était sortie délicatement du sol et placée à l'horizontal. La plaque située sur le dessus était alors enlevée et les 14 zones de sol étaient « découpées » (Figure 5) selon le patron présenté à la Figure 6 et placées dans un sac de plastique. Le $N-NH_4$ et le $N-NO_3$ étaient dosés dans chacun des 14 cubes de butte.



Figure 5. Coupe transversale d'une butte et découpage des 14 sous-sections (cubes).

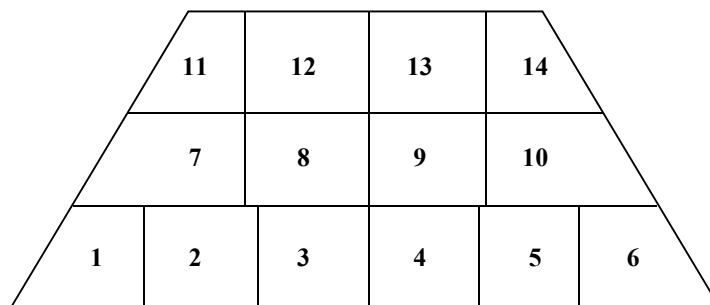


Figure 6. Répartition des 14 cubes découpés dans la tranche de sol prélevée dans la butte.

Dans tous les cas, les sols prélevés étaient placés dans une glacière et conservés à 4 °C jusqu'à leur analyse au laboratoire. Les sols ont été tamisés à 2 mm, puis séchés à l'air à 21 °C, excepté ceux servant aux analyses mesurant l'activité biologique, qui étaient tamisés frais à 4 mm. Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des productions végétales du Québec, 1988). Le C_{tot} et N_{tot} ont été déterminés au Leco. Le contenu en MO totale a été calculé selon le contenu en C_{tot} avec un facteur de 1,724. Le $N-NO_3$ des échantillons de sol a été extrait au KCl 2 M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminé par colorimétrie au Technicon AA-II. Dans l'échantillon prélevé au printemps, le P et les éléments mineurs ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et Coll., 1992) et dosés à l'ICP optique. Le N minéral disponible a aussi été extrait par la méthode de saturation du sol à l'eau (méthode SSE) (CPVQ, 1988). Pour ce faire, le

sol humide a été mélangé avec une quantité d'eau déminéralisée et ce, avec un volume suffisant pour le porter à saturation. Après brassage, le sol a été laissé à reposer 1 heure. Le surnageant a été filtré sur un Buchner à vide et le N-NH₄ et le N-NO₃ du filtrat, considéré comme un extrait aqueux, ont été déterminés par colorimétrie au Technicon AA-II. Le taux global d'activité biologique du sol a été estimé par la respiration microbienne définie comme étant le dégagement de CO₂. Au laboratoire, le sol a été incubé à température contrôlée dans un contenant fermé et le CO₂ dégagé a été fixé par une solution de NaOH 1N. Le CO₂ capté a été mesuré par titrage au HCl 1N. L'activité de l'enzyme uréase a aussi été dosée par incubation. Le sol frais a été mis à incubé à 37°C pendant deux heures. Le N-NH₃ libéré a ensuite été extrait avec une solution de KCl 1N et de HCl 0,01M, ce dernier agissant comme agent inhibiteur sur l'enzyme (Kandeler et Gerber, 1988) et a été dosé par colorimétrie au Technicon AA-II. Par ailleurs, la granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points suivis d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986).

Enfin, avant leur emploi au champ, les MEI anioniques et cationiques ont été nettoyées par agitation dans une solution de HCl 0,5N en séquence de 30 minutes. Elles ont ensuite été rincées trois fois à l'eau déminéralisée pour enlever toute trace d'acide. Puis elles ont été saturées par agitation dans une solution de NaHCO₃ 0,5M, changée aux heures pour une période de 5 heures. Les MEI ont ensuite été à nouveau rincées à l'eau déminéralisée trois fois, puis conservées dans l'eau à 4°C jusqu'à leur utilisation. Lors de leur récupération au champ, les 3 paires de MEI ont été déterrées, puis nettoyées à l'eau déminéralisée et placées ensemble dans un tube d'extraction contenant une solution de KCl 2N. De retour au laboratoire, les tubes ont été agités deux heures, puis la solution extractive a été filtrée. Par la suite, le N-NH₄ et le N-NO₃ de cette solution étaient dosés au Technicon AA-II. Pour chacun de ces éléments, les données représentent la valeur moyenne des trois MEI de même charge utilisées par parcelle. Les flux sont exprimés par unité de surface de MEI, par période, soit en $\mu\text{g cm}^{-2} \text{ période}^{-1}$.

3.2.2 *Développement et nutrition des plants*

Des échantillonnages foliaires ciblés permettant de suivre le statut nutritionnel des plants ont été faits à quatre reprises en cours de saison. Dans chacune des parcelles, 15 folioles ont été prélevées et conservées dans une glacière à 4 °C, jusqu'à leur réception au laboratoire pour y être analysées. Avant analyse, les folioles ont été séchées à 65 °C et broyées à 100 mesh. Le N_{tot} a alors été extrait selon la méthode Kjeldahl (Isaac et Johnson, 1976) et dosé par colorimétrie automatisée sur autoanalyseur Technicon.

Pour chacune des parcelles, un fraisier témoin a été identifié sur lequel le taux de croissance des feuilles et des inflorescences (cymes bipares) était mesuré. De plus, à quatre reprises dans la saison, des plants (partie arienne) ont été récoltés, puis séchés à 65 °C et pesés, pour suivre l'évolution de la masse sèche (MS). Pour trois de ces quatre dates, les plants ont aussi été analysés pour leur contenu en N_{tot} afin de pouvoir calculer les prélèvements (PVL) en N_{tot}. Pour ce faire, les plants ont été broyés à 100 mesh pour permettre l'extraction du N_{tot} selon la méthode Kjeldahl (Isaac et Johnson, 1976). Le N_{tot} extrait a ensuite été dosé par colorimétrie automatisée sur autoanalyseur Technicon. Il est à noter que ces prélèvements sont valides pour chacune des dates, mais ne peuvent être additionnés puisque les plants demeurent les mêmes sur

toute la saison et, donc, chaque dosage contient en bonne partie ce qui a déjà été dosé à la date précédente. À trois reprises en saison, des fruits ont aussi été récoltés, en plus de ceux servant à établir les rendements, dans le but d'estimer les exportations (EXP) de N_{tot} par la récolte. Il est important de considérer que cette variable est une estimation puisqu'il était impossible de doser le N_{tot} de tous les fruits de chacune des récoltes effectuées sur la saison. La production totale a donc été divisée en trois périodes pour lesquelles un prélèvement en N_{tot} a été attribué. Pour ce faire, des fraises ont été échantillonnées à la mi-temps de chacune de ces périodes. Elles ont ensuite été classées en fraises vendables et non vendables, au cas où la qualité aurait modifié le contenu en N_{tot} . Elles ont ensuite été préparées et analysées pour le N_{tot} tel que décrit pour les plants. Les calculs des prélèvements et des exportations de N_{tot} ont par la suite été réalisés comme suit :

Quantité de N_{tot} retrouvé dans les plants à chacune des dates :

$$PVL N_{tot} \text{ plant} = MS \text{ plant} * \text{concentration en } N_{tot} \text{ plants}$$

Quantité totale estimée de N_{tot} prélevé par les fruits et exporté pendant la saison :

$$EXP N_{tot} \text{ période} = (MS * \text{concentration en } N_{tot}) \text{ fraise vendable période} \\ + (MS * \text{concentration en } N_{tot}) \text{ fraise non vendable période}$$

$$EXP N_{tot} \text{ totale} = EXP N_{tot} \text{ période 1} + EXP N_{tot} \text{ période 2} + EXP N_{tot} \text{ période 3}$$

Quantité totale estimée de N_{tot} prélevé pour l'ensemble de la saison :

$$PVL N_{tot} \text{ total} = PVL N_{tot} \text{ plant 3}^{\text{e}} \text{ date} + EXP N_{tot} \text{ totale}$$

3.2.3 Conditions météorologiques

Une station météo complète a été installée sur le site afin de mesurer en continu les précipitations (pluviomètre HOBO, modèle RG3-M), la température et l'humidité relative de l'air ambiant (sonde HC-S3 de Campbell Scientific), la vitesse et la direction des vents (moniteur 05103-10 de Campbell Scientific), ainsi que la radiation solaire (pyranomètre LI200S de Campbell Scientific). Hormis le pluviomètre qui était pourvu d'un acqui-siteur de données intégré, les différents appareils de mesure étaient reliés à un CR1000 (acqui-siteur de données de Campbell Scientific) (mesures moyennes enregistrées aux 15 minutes provenant de mesures effectuées aux 15 secondes).

3.2.4 Suivi de la tension de l'eau et de la température du sol

La tension de l'eau dans le sol faisait l'objet d'un suivi dans chacune des parcelles. Ce suivi était nécessaire à la gestion des épisodes d'irrigation. Pour ce faire, un tensiomètre (modèle Irrrometer 0-80 kPa) par parcelle était installé. La consigne pour déclencher une irrigation était la même pour l'ensemble des traitements et cette dernière était déterminée à partir des caractéristiques physiques du sol en culture et de la profondeur d'enracinement. Compte tenu que le mode de libération du N de l'engrais ELC dépend de la température du sol (120 jours cumulés de 24 heures à $\geq 21^{\circ}\text{C}$), un suivi des températures a aussi été effectué à plusieurs endroits dans la butte de sol. Pour ce faire des thermocouples ont été installés au printemps à 3 profondeurs en 2010 (2, 6 et 10 po) et aux 14 zones de suivi en 2011 (Figure 7).

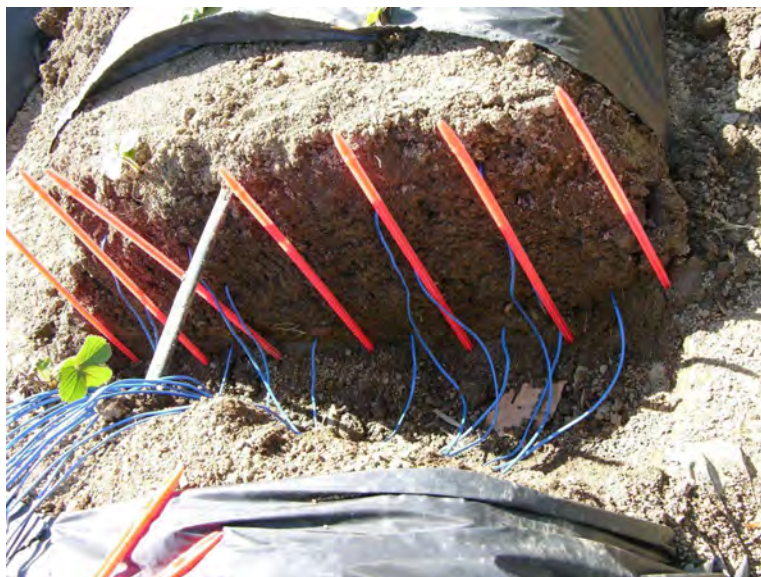


Figure 7. Installation des thermocouples peu de temps après la plantation, avant la reconstruction de la butte.

3.2.5 Récolte

En 2010, la récolte des fruits a débuté durant la semaine du 23 juin pour se terminer le 8 octobre. L'année suivante, les premiers fruits mûrs ont été récoltés le 15 juillet et les derniers, le 11 octobre. La récolte des fruits était effectuée selon le calendrier du producteur, soit aux deux ou trois jours, dépendamment des conditions météorologiques, des traitements phytosanitaires et du mûrissement des fruits. Les fruits étaient pesés et classés en trois catégories : vendables, petits et non vendables. Les fruits qui avaient un poids inférieur à 6 g (petits) ou qui avaient des défauts (biotiques et abiotiques) étaient considérés comme non vendables. Les rendements ont été regroupés par période bihebdomadaire. Ces périodes sont au nombre de 8 et de 7, en 2010 et 2011, respectivement (Tableau 5).

Tableau 5. Calendrier des récoltes bihebdomadaires de fruits pour les saisons 2010 et 2011.

Période	2010		2011	
	Début	Fin	Début	Fin
1	28 juin	10 juil.	15 juil.	27 juil.
2	11 juil.	23 juil.	28 juil.	9 août
3	24 juil.	5 août	10 août	22 août
4	6 août	18 août	23 août	4 sept.
5	19 août	31 août	5 sept.	17 sept.
6	1 sept.	13 sept.	18 sept.	30 sept.
7	14 sept.	26 sept.	1 oct.	11 oct.
8	27 sept.	8 oct.	-	-

4 RÉSULTATS ET ANALYSE

4.1 Développement et nutrition des plants

Les mesures de masse sèche des plants effectuées juste avant le début de la fertigation (Tableau 2 et Tableau 4) démontrent que le type d'engrais utilisé lors de l'implantation n'a pas eu d'effet sur la croissance végétative des plants à ce stade. Les mesures réalisées par la suite vont dans le même sens. En fait, aucune des deux années d'étude n'a permis d'identifier un effet attribuable au type d'engrais de départ ou à la dose de N fertilisé sur la croissance des plants. L'évolution de la masse sèche moyenne des plants, tous traitements confondus, est donc présentée à la Figure 8. Ainsi, les deux années, les plants ont connu une bonne reprise suite à l'implantation réalisée au printemps. Par la suite, ils se sont bien développés et ont conservé une masse sèche stable sur plusieurs mois, jusqu'à la fin des récoltes. Toutefois, les plants de 2011 étaient plus petits que ceux de 2010, sur une bonne partie de la saison. Cette différence est probablement due au printemps tardif de 2011 qui a fait en sorte que les plants ont été transplantés 11 jours plus tard cette année-là, comparativement à 2010. Ainsi, l'écart entre les plants des deux années est particulièrement grand en juin, les plants de 2010 ayant un poids sec d'environ $4,5 \text{ g plant}^{-1}$, comparativement à 2 g plant^{-1} en 2011. En août et octobre, les plants 2010 sont encore 20 et 15 % plus gros que ceux de 2011, respectivement. Une situation similaire s'est aussi reflétée dans les rendements qui ont été moins élevés en 2011, tel qu'il en sera discuté à la section 4.1.1.

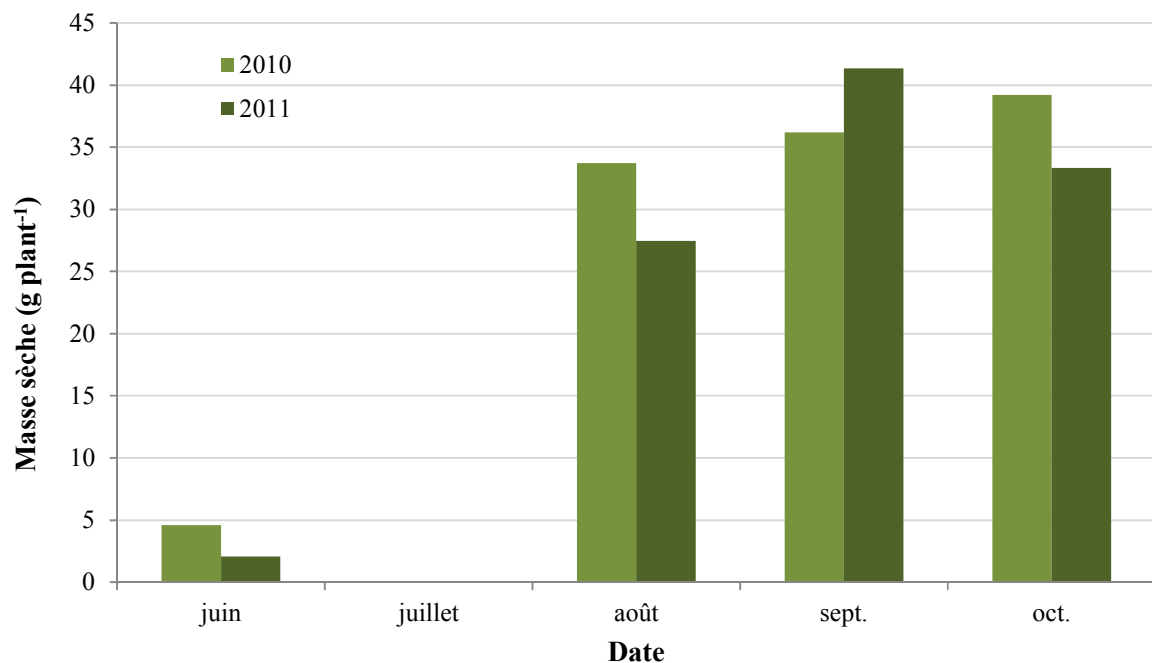


Figure 8. Évolution de la masse sèche moyenne des plants de fraisiers en cours de saison, été 2010 et 2011.

En ce qui a trait au prélèvement en N_{tot} par les plants, les résultats suivent ceux de leur développement. Ainsi, le type d'engrais au buttage et la dose de N fertilisé en saison n'ont eu que très peu d'effet sur ce paramètre. En fait, en ce qui a trait à la fertilisation printanière, des prélèvements similaires ont été générés avec les trois types d'engrais les deux années, même lors de la 1^{ère} mesure, réalisée juste avant le début de la fertigation. Dans le cas de la fertigation, il existe une légère interaction avec les périodes ($P = 0,0619$). Ainsi, seule la mesure du mois d'août de 2010 présente une tendance ($P = 0,0933$) à un prélèvement de 16 % supérieur en N avec la plus forte dose de N fertilisé (N100), comparativement à la dose N0 (Figure 9). Par contre, il n'y a eu aucun gain significatif à apporter la dose N100, comparativement à la dose N50. Ensuite, pour toutes les autres dates de 2010 (Figure 9) et pour toute la saison 2011 (Figure 10), l'apport de N par fertigation n'a pas permis d'atteindre au final de meilleurs prélèvements en N par les plants.

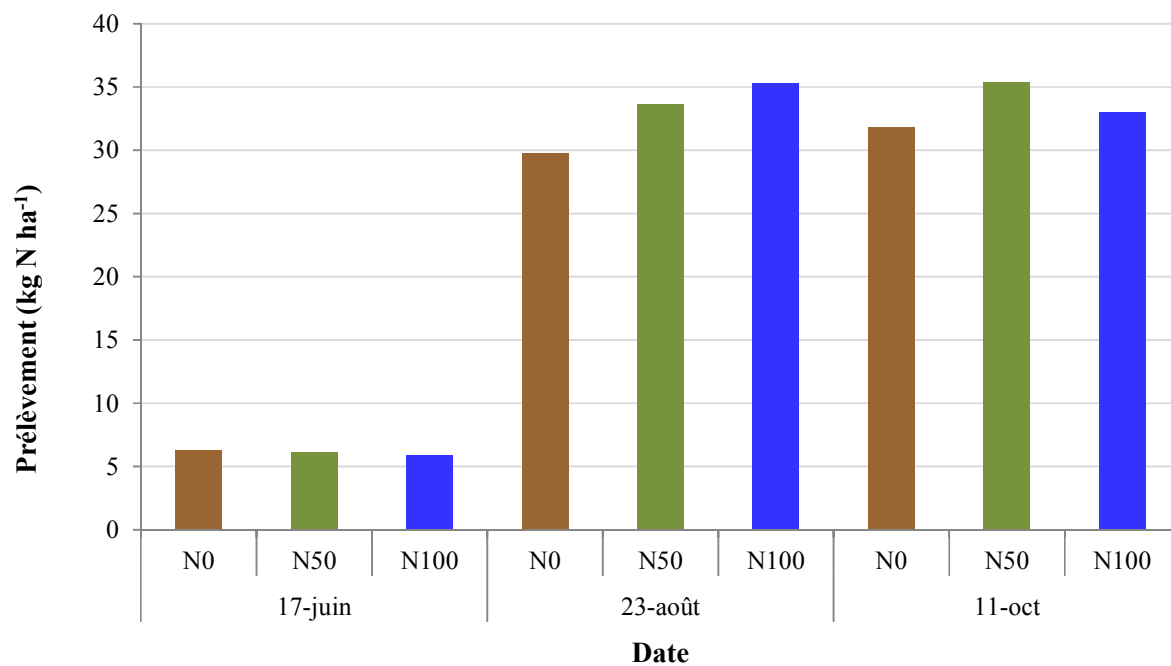


Figure 9. Évolution du prélèvement moyen en N_{tot} des fraisiers en cours de saison, été 2010.

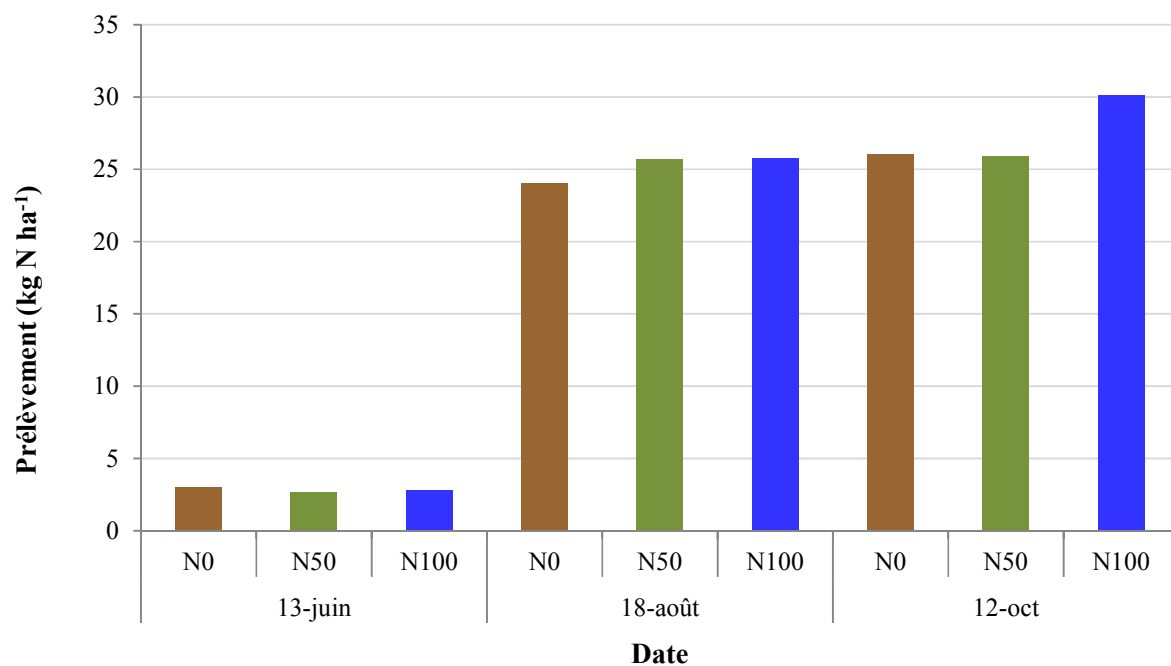


Figure 10. Évolution du prélèvement moyen en N_{tot} des fraisiers en cours de saison, été 2011.

En termes de quantité de N prélevé, juste avant le démarrage de la fertigation, 6 et 3 kg N ha⁻¹ se retrouvaient dans les plants de fraisier en 2010 et 2011, respectivement. Cette valeur est faible comparativement au 50 kg N ha⁻¹ appliqué au buttage 7 et 5 semaines plus tôt en 2010 et 2011, respectivement (Tableau 6). Par la suite, après quatre mois de développement au champ (août), les fraisiers contenaient dans leurs parties aériennes de 30 à 35 kg N ha⁻¹ en 2010 et de 24 à 26 kg N ha⁻¹ en 2011, selon les doses de N fertigué (Tableau 6). À ce stade, à la dose N100, la somme d'engrais N apporté au buttage et par fertigation atteignait 88 et 106 kg N ha⁻¹ en 2010 et 2011, respectivement. Sur cette base, la quantité de N comprise dans les plants équivalait donc plus ou moins à 37 et 24 % du N apporté à ce stade en 2010 et 2011, respectivement. En fin de saison, au moment de terminer les récoltes, la quantité de N fixé dans les plants est demeurée relativement constante. Évidemment, la quantité de N prélevé par les plants n'est pas statique puisque ceux-ci se renouvellent en partie au cours de la saison. Par exemple, ils produisent de nouvelles feuilles et perdent les plus vieilles, contenant du N, au sol. Quoiqu'il en soit, ces quantités demeurent relativement petites comparativement à celle des plants entiers. On peut ainsi considérer que, globalement, les plants de fraisiers contenaient en fin de saison dans leurs parties aériennes 33 et 27 kg N ha⁻¹ en 2010 et 2011, respectivement, ce qui correspond à 31 et 23 % des 106 et 120 kg N ha⁻¹ apportés sur toute la saison en 2010 et 2011, respectivement, selon la dose recommandée N100 (Tableau 6).

Tableau 6. Estimés des prélèvements et exportations de N par la culture, saisons 2010 et 2011.

Variables	Dates	Prélèvements		Exportations		Total	
		----- kg N ha ⁻¹ -----		----- kg N ha ⁻¹ -----		----- kg N ha ⁻¹ -----	
		2010	2011	2010	2011	2010	2011
Plants	Mi-juin [†]	6	3				
	Mi-août	30-35	24-26				
	Début octobre	33	27				
Fruits	Période 1 [†]			15	10		
	Période 2			7-8	5		
	Période 3			6-8	5		
	Total partiel	33	27	28-31	20		
	Total saison [‡]					62	47

[†] Analyses SAS effectuées sur la valeur des prélèvements pour les plants, ou des exportations pour les fruits, de chacune des 3 périodes de mesures séparément, à chacune des années.

[‡] Analyses SAS effectuées sur la somme des exportations des 3 périodes de mesures, à chacune des années.

À ces prélèvements par les plants, s'ajoute la part de N ayant été exportée hors du site par les récoltes périodiques de fraises. L'analyse statistique de chacune des périodes de mesure des deux années d'étude révèle tout d'abord que les exportations de N varient selon les périodes de récoltes (effet Période à $P = 0,0001$) les deux années, ce qui était attendu puisque la production est modulée sur la saison. Par ailleurs, en ce qui a trait au type d'engrais et à la dose de N fertigué, les résultats varient selon les années.

En 2010, année où le printemps a été hâtif et où les récoltes ont débuté tôt, le type d'engrais et la dose de N fertigué ont eu un impact significatif sur les exportations de N. D'une part, il existe à chacune des périodes, une interaction entre le type d'engrais et la dose de N

fertigué (Type x Dose de N fertigué à $P = 0,0529$) (Figure 11). Ainsi, avec l'emploi de l'engrais conventionnel, les exportations en N ont été 14 % plus élevées avec l'application de la dose fertiguée N100 ($P = 0,0190$), comparativement à la dose N0. Par contre, il n'y a pas eu de gain à appliquer la dose N100, comparativement à la dose N50. Avec l'engrais organique, la dose de N fertigué n'a eu aucune influence. Enfin, avec l'engrais à libération contrôlée, les exportations ont été de 11 % plus élevées en absence de fertigation N (N0) ($P = 0,0481$), comparativement à l'apport de la dose N100. Toutefois, la dose N50 n'a pas eu le même effet négatif et les exportations mesurées ne sont pas statistiquement différentes entre les doses N0 et N50. D'autre part, l'influence de la fertigation sur les exportations de N tend à être différente selon les périodes (Période x Dose de N fertigué à $P = 0,0932$) (Figure 12). Ainsi, durant la 1^{ère} période se terminant le 18 août (28 juin-18 août), l'apport fertigué de N n'a eu aucun impact sur les exportations de N, malgré le fait qu'à cette date, 7 épisodes de fertigation avaient déjà été réalisés. Conséquemment, à la fin de cette période, qui comprend 50 % de la production, des exportations de 15 kg N ha⁻¹ en moyenne ont été calculées (Tableau 6). Par la suite, au cours de la 2^e période (19 août-6 septembre), qui englobe 25 % de la production, des exportations légèrement supérieures de 6 et 10 % ont été générées avec la dose N50, comparativement aux doses N0 ($P = 0,1305$) et N100 ($P = 0,0347$), respectivement. Ainsi, des exportations de 7 à 8 kg N ha⁻¹ ont été mesurées (Tableau 6). Enfin, au cours de la 3^e période (7 septembre-8 octobre), qui couvre le dernier 25 % de production, les exportations ont été supérieures de 14% avec la dose N100, comparativement à la dose N0 ($P = 0,0511$). Par contre, la dose N50 a donné des prélèvements aussi élevés que la dose N100. Ainsi, des exportations de 6 à 8 kg N ha⁻¹ ont été mesurées (Tableau 6) pour cette dernière période.

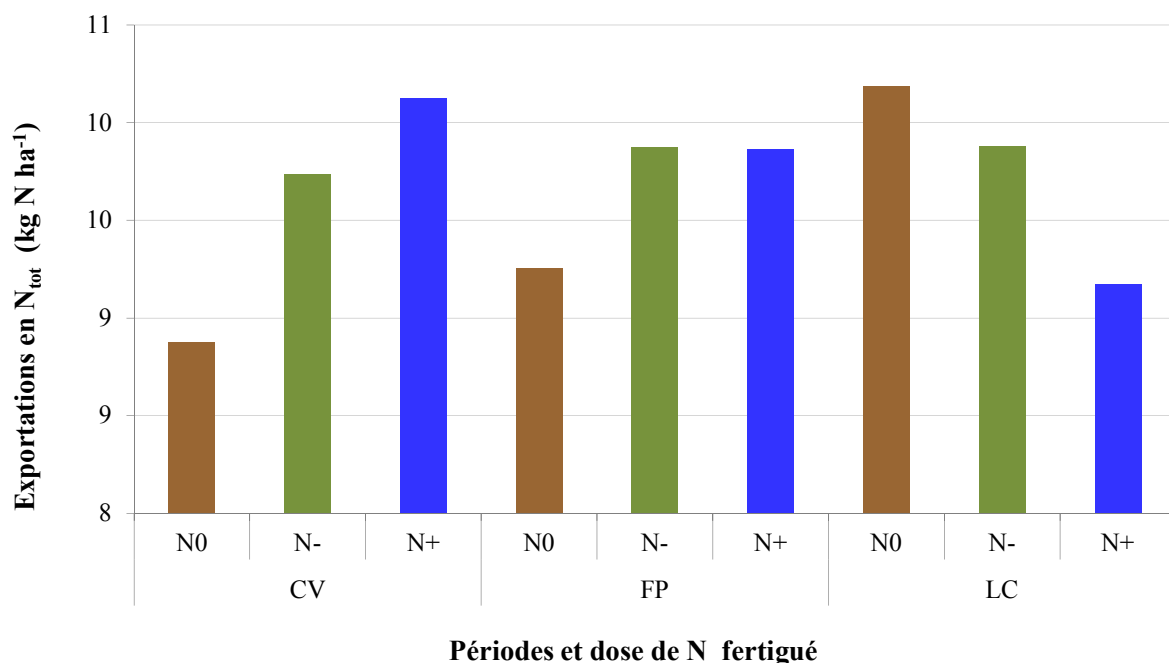


Figure 11. Exportations de N_{tot} par les récoltes successives de fraises selon le type d'engrais et la dose de N fertigué, été 2010.

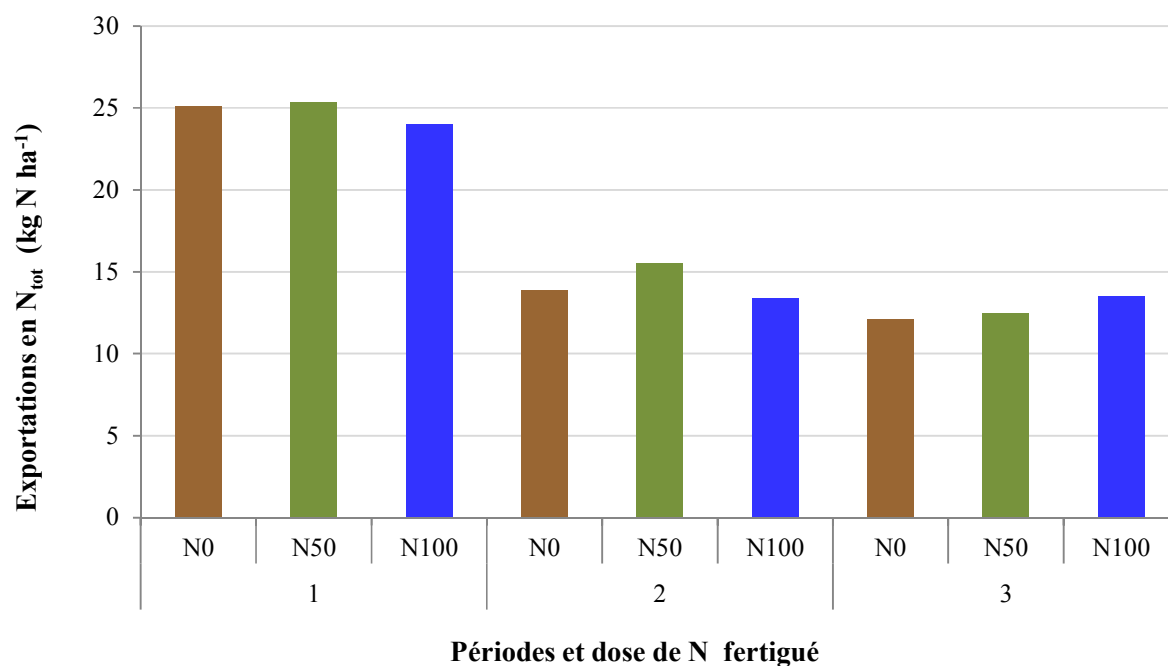


Figure 12. Évolution par période des exportations de N_{tot} par les récoltes successives de fraises selon la dose de N fertilisé, été 2010.

En 2011, l'analyse statistique des exportations de N par période révèle que la dose de N fertilisé n'a eu aucun impact sur cette variable, peu importe la période de mesure (Figure 13). Ainsi, durant la 1^{ère} période (15 juillet-25 août), qui couvre 50 % de la production, les exportations de N mesurées valaient en moyenne 10 kg N ha⁻¹. La différence entre les prélèvements de 2010 et ceux de 2011, pour cette 1^{ère} période, tient principalement au fait que les récoltes étaient débutées depuis 9 semaines à cette date en 2010, mais seulement depuis 5 semaines en 2011. Par la suite, au cours des 2^e (26 août-6 septembre) et 3^e (7 septembre-11 octobre) périodes, qui couvrent chacune 25 % de la production, des exportations similaires de 5 kg N ha⁻¹ ont été mesurées. Ces exportations sont encore une fois inférieures à celle de 2010, principalement parce qu'au final, la production en fraises a été moindre en 2011.

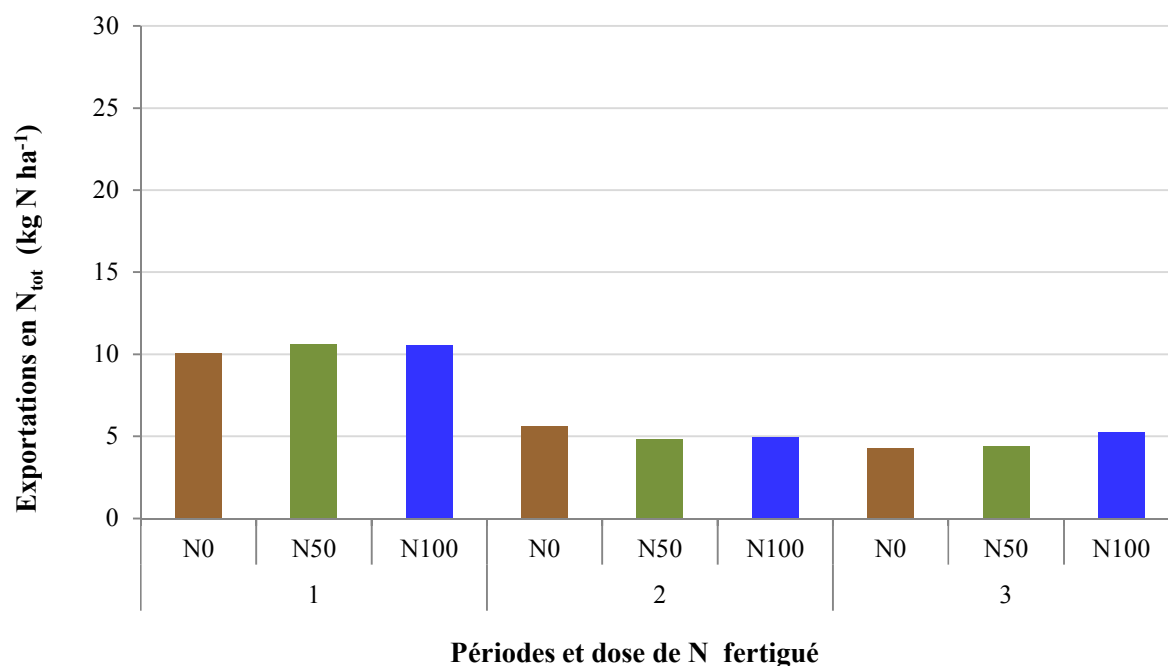


Figure 13. Évolution par période des exportations de N_{tot} par les récoltes successives de fraises selon la dose de N fertiligué, été 2011.

L'analyse statistique de la somme des exportations sur les trois périodes, en 2010, réitère l'interaction observée par période, soit que la fertiligation n'a pas eu, au final, le même impact selon le type d'engrais appliqué au buttage. Ainsi, avec l'engrais conventionnel, la fertiligation à la dose N50 ($P = 0,0601$) et N 100 ($P = 0,0095$) ont bénéficié aux exportations, comparativement à la dose N0. Par contre, les exportations ont été similaires entre les doses N50 et N100 ($P = 0,3699$). En 2011, il ressort que ni l'engrais de printemps, ni la fertiligation, n'ont eu d'effet significatif sur les exportations totales de N, les deux années. En termes de kg de N exportés, les exportations totales moyennes en N de 2010 ont donc été estimées à 29 kg N ha⁻¹ et celles de 2011 à 20 kg N ha⁻¹ (Tableau 6). Selon ces estimés, en 2010, la quantité totale de N exporté par la récolte représente donc 27, 37 et 58 % des quantités de N apporté sur la saison (buttage + fertiligué) pour les traitements N100, N50 et N0, respectivement. En 2011, la quantité totale de N exporté par la récolte représente pour sa part 17, 24 et 40 % des quantités de N apporté sur la saison (buttage + fertiligué) pour les traitements N100, N50 et N0, respectivement.

Si l'on cumule les prélèvements par les plants et les exportations par les récoltes, l'examen des résultats dans le temps révèle qu'à la fin de la 1^{ère} période de production, soit fin août, ce sont les quantités de N retrouvé dans les plants qui sont encore les plus importantes, bien que les récoltes aient commencé. De plus, à cette date, le prélèvement en N combiné des plants et des fruits atteignait 48 et 35 kg N ha⁻¹ en 2010 et 2011, respectivement. Comparativement aux apports cumulés (buttage et fertiligation) recommandés de N du traitement N100, ces prélèvements équivalent donc à 55 et 33 % des 88 et 106 kg N ha⁻¹ apporté à cette date en 2010 et 2011, respectivement. À la fin de la 2^e période de mesure, soit au 6 septembre les deux années, le prélèvement en N combiné des plants et des fruits atteignait 55 et 40 kg N ha⁻¹ en 2010 et 2011, sur les 97 et 115 kg N ha⁻¹ apportés, respectivement, dans le traitement N100. Autrement dit, des

quantités équivalentes à 57 et 35 % des apports azotés à cette date en 2010 et 2011, respectivement. Enfin, à la fin de la 3^e période, soit au début octobre, les prélèvements totaux en N par la culture totalisaient 62 et 47 kg N ha⁻¹ en 2010 et 2011, respectivement, sur les 106 et les 120 kg N ha⁻¹ apportés au global par l'engrais de printemps et la fertigation à la dose N100. Autrement dit, des quantités équivalentes à 58 et 39 % des apports azotés à cette date en 2010 et 2011, respectivement.

Étant donné qu'aucune parcelle non fertilisée en N n'a été produite dans le cadre de cette étude, il n'est pas possible de départager la part de N fourni par le sol, de celle provenant des engrais. Ainsi, on ne peut pas extrapoler quelle part des 62 et 47 kg N ha⁻¹ utilisés par la culture en 2010 et 2011, respectivement, provenait effectivement du N apporté sous forme d'engrais. Toutefois, il est possible de statuer que même si 100 % du N prélevé par la culture provenait des engrais, ce qui n'est jamais le cas, 44 et 72 kg N ha⁻¹ resteraient quand même non prélevés, considérant le traitement N100. Dans tous les cas, il demeure donc que les apports recommandés sont supérieurs aux besoins, particulièrement lors d'une année moins propice à la production, telle 2011, où il existe un écart important de 2,5 fois entre les apports totaux en N (buttage et fertigation) à la dose N100 et l'estimation des prélèvements totaux. Ainsi, si les prélèvements par les plants se ressemblent les deux années, la partie retrouvée dans les fruits est très variable et dépendante du rendement produit. Par exemple, dans le cadre de cette étude, le prélèvement total en N (plant et fruit) de 2010 est 1,5 fois plus élevé que celui de 2011. Enfin, au final sur la saison, les prélèvements par les plants demeurent supérieurs à ceux résultant des récoltes de fraises, les deux années.

En fait, une comparaison des prélèvements totaux avec les deux autres doses d'apports de N (N0 et N50) indique que lors d'une année productive, telle 2010, le prélèvement total en N se rapproche (80 %) des apports azotés cumulés avec le traitement N50 (78 kg N ha⁻¹) et dépassent largement (124 %) ceux appliqués avec le traitement N0 (50 kg N ha⁻¹). Il faut donc se demander si en situation de production importante, la productivité de la culture ne pourrait pas être limitée par l'utilisation de seulement 50 kg N ha⁻¹ au buttage. En 2011, dû aux rendements moins élevés, le prélèvement total se rapproche (95 %) plutôt des apports du traitement N0 (50 kg N ha⁻¹). Toutefois, étant donné que le prélèvement total en N de 2011 est très proche de l'apport de 50 kg N ha⁻¹ (N0), que les rendements obtenus en 2010 sont plus représentatifs du rendement annuel moyen et que le prélèvement total en N y dépasse largement l'apport de 50 kg N ha⁻¹, sur le long terme, le traitement N50 (78 kg N ha⁻¹) pourrait s'avérer un choix judicieux.

Finalement, les analyses foliaires de N en cours de saison viennent corroborer le bon développement des plants pour l'ensemble des fertilisations. En effet, le statut nutritionnel de ceux-ci se maintient dans la fourchette des teneurs optimales en N se situant entre 2,0 et 3,5 % (MAAARO 2012), quel que soit le type d'engrais utilisé au buttage ou la dose de N fertigué (Figure 14 et Figure 15). Ainsi, bien que les teneurs s'abaissent entre la mi-juin et la mi-juillet, celles-ci remontent par la suite et se maintiennent à un niveau adéquat jusqu'en fin de saison. La seule différence significative mesurée lors de l'étude concerne le traitement utilisant l'engrais conventionnel au buttage sans apport de N fertigué (CV N0) pour l'année 2011. À la Figure 15, on voit ainsi distinctement que les teneurs foliaires en N de ce traitement n'arrivent pas à remonter suivant le 15 juillet (18 août, $P < 0,0100$; 22 septembre, $P < 0,0020$). Quoi qu'il en soit, les valeurs se maintiennent au niveau du seuil de suffisance. D'ailleurs, cette différence de statut

nutritionnel ne se reflète pas au niveau du développement des plants et des rendements produits, indiquant que les plants n'ont pas manqué de N.

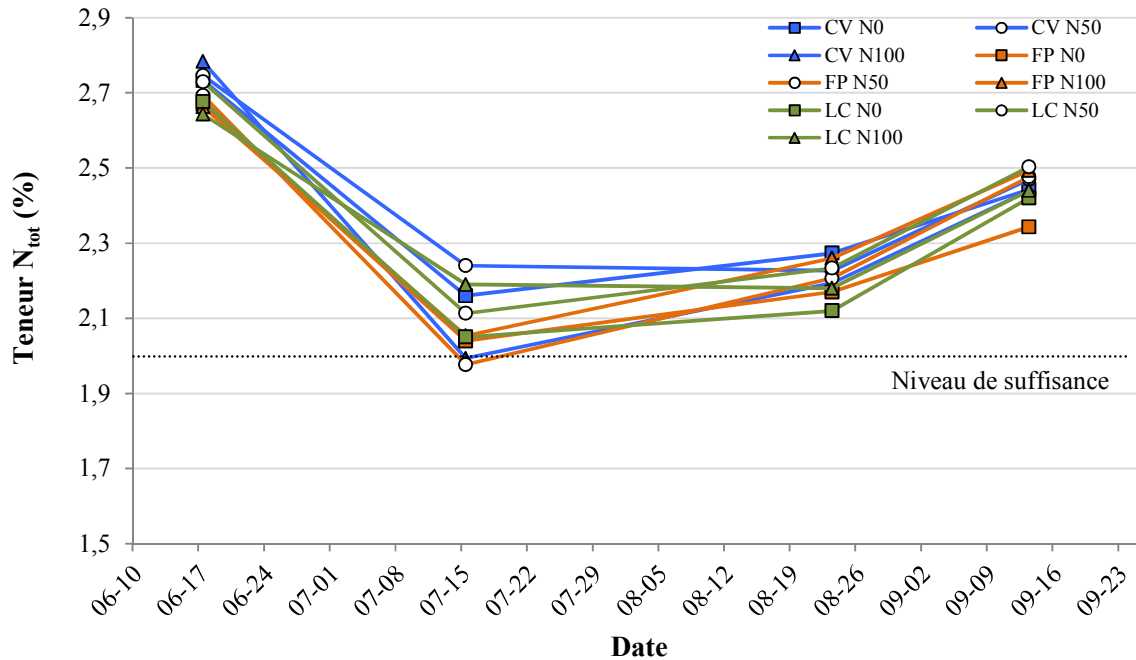


Figure 14. Contenus en N total dans les folioles de fraisiers en cours de saison selon le type d'engrais de départ et la dose de fertigation, été 2010.

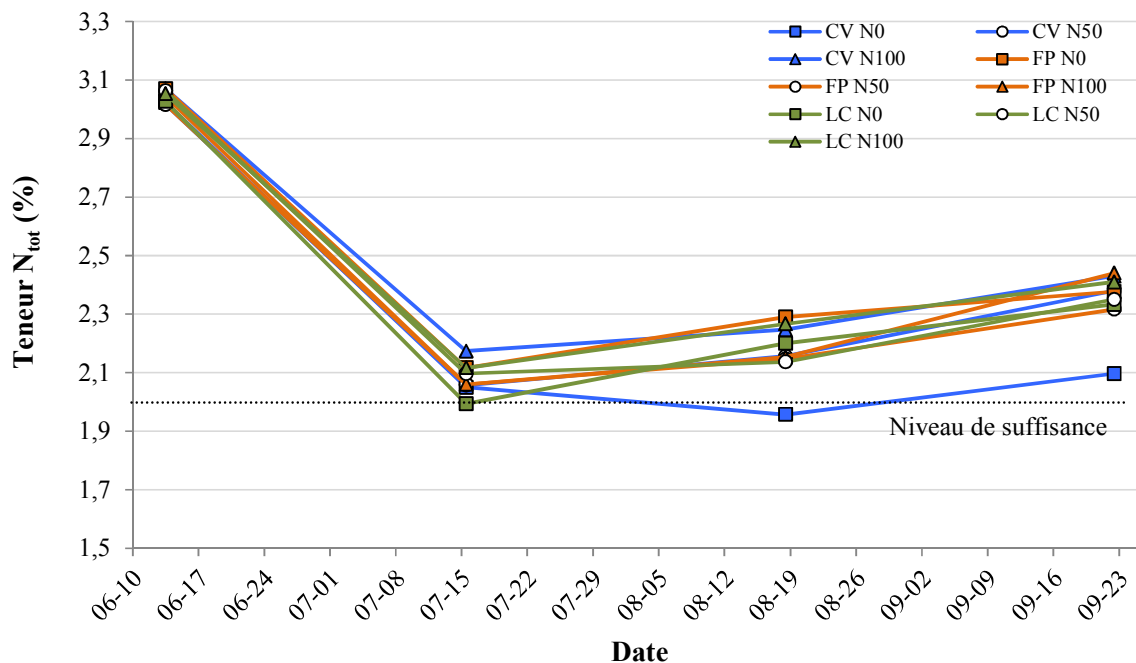


Figure 15. Teneurs en N_{tot} dans les folioles de fraisiers en cours de saison selon le type d'engrais de départ et la dose de fertigation, été 2011.

4.1.1 Rendements en fraises

Qu'il soit question des feuilles ou des inflorescences, leur nombre moyen produit par plants sur la saison est plus élevé en 2010 qu'en 2011, et ce, peu importe le type d'engrais utilisé. Ainsi, en 2010, de 1,4 à 2 fois plus de nouvelles feuilles et de 1,9 à 2,3 plus de nouvelles cymes ont été produites, qu'en 2011, par plant. Ceci concorde avec le fait que les rendements totaux en fruits mesurés en 2010 sont aussi plus élevés qu'en 2011, tel qu'il en sera question ci-après. Les nombres moyens de nouvelles feuilles et cymes sont présentés aux Figure 16 et Figure 17 par type d'engrais utilisé au buttage car la dose de N fertilisé en saison n'a eu aucun impact significatif sur ces paramètres les deux années, tandis que le type d'engrais a eu un effet significatif sur eux en 2010. Ainsi, en 2010, le type d'engrais utilisé au buttage a influencé ($P = 0,0143$) tant le nombre de nouvelles feuilles que de nouvelles cymes produites par plant. Avec l'engrais organique, 55 et 60 % plus de nouvelles feuilles ont donc été produites par plant sur la saison qu'avec l'engrais conventionnel ($P = 0,0519$) et à libération contrôlée ($P = 0,0045$). De même, 30 et 57 % plus de nouvelles cymes ont été produites par plant sur la saison avec l'engrais organique, comparativement aux engrais conventionnel ($P = 0,0069$) et à libération contrôlée ($P = 0,0046$). Tel qu'il le sera discuté plus loin, ce gain ne s'est toutefois pas traduit en rendement plus élevé en fruits au terme de la saison. En 2011, le nombre de feuilles et de cymes dénombrées pour chacun des trois types d'engrais est semblable.

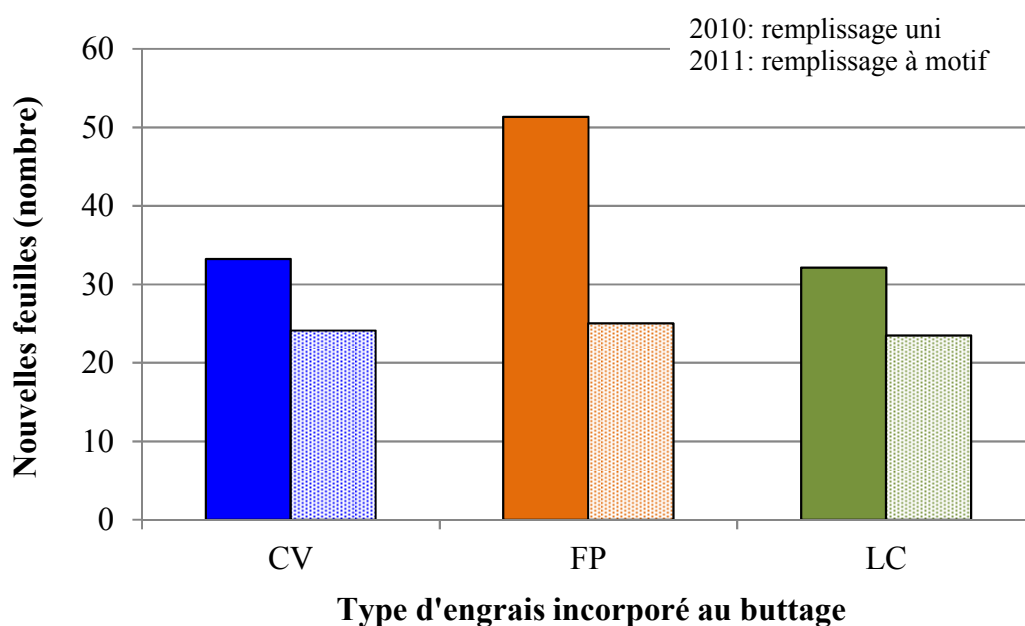


Figure 16. Nombre moyen de nouvelles feuilles par fraisier selon le type d'engrais incorporé au buttage en 2010 et 2011.

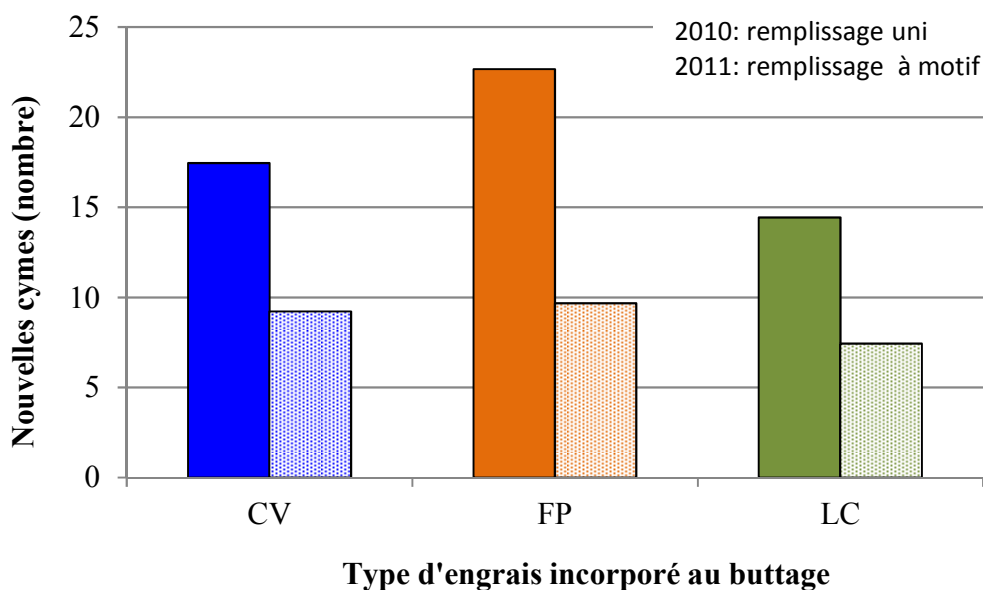


Figure 17. Nombre moyen de nouvelles cymes (inflorescences) par fraisier selon le type d'engrais incorporé au buttage en 2010 et 2011.

Les analyses statistiques ayant trait aux rendements ont révélé des différences significatives pour le facteur temps (Bihebdomadaire à $P < 0,0001$) les deux années. De telles différences sont toutefois attendues puisque la distribution des rendements sur une saison observe généralement une augmentation graduelle jusqu'à l'atteinte d'un plateau, pour ensuite diminuer (Figure 18 et Figure 19). De plus, en 2010, il existe une interaction entre le type d'engrais appliqué au buttage et la dose de N fertilisé en saison (Type x Fertigation à $P = 0,0581$). En 2011, une telle interaction n'est pas présente puisque des rendements totaux équivalents ont été obtenus, quelle que soit la fertilisation. Toutefois, il existe une interaction significative entre le type d'engrais utilisé au buttage selon le facteur temps (Type x Bihebdomadaire à $P = 0,0044$). Par ailleurs, il est à noter que les rendements en fruits présentés dans les graphiques qui suivent sont rapportés sur une base relative. Ainsi, le rendement le plus élevé correspond à 100 % et les autres, nécessairement plus bas, sont exprimés en % de la valeur la plus élevée.

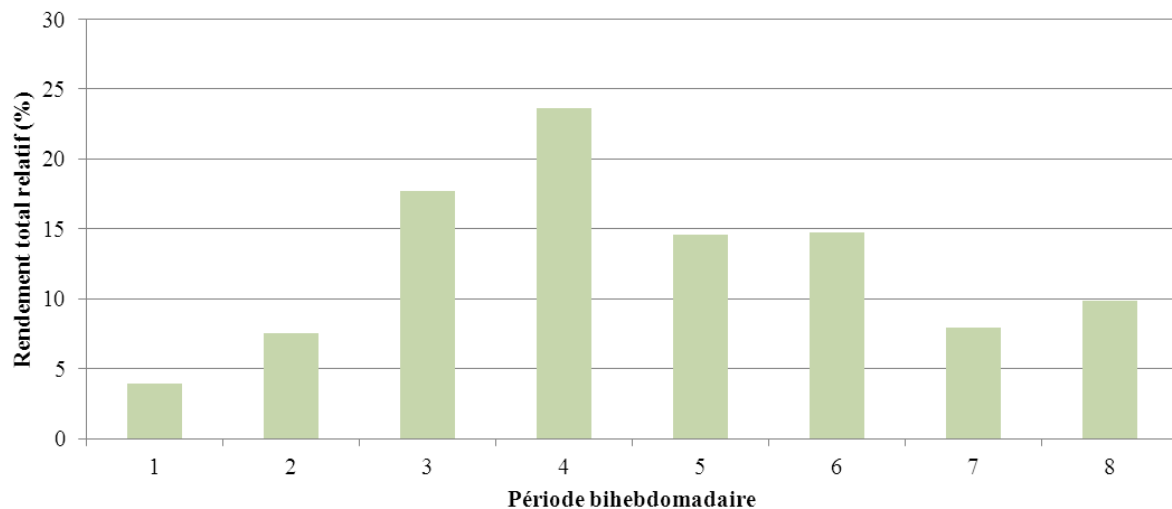


Figure 18. Rendement total relatif en fruits (poids) selon la période en 2010, tous traitements confondus.

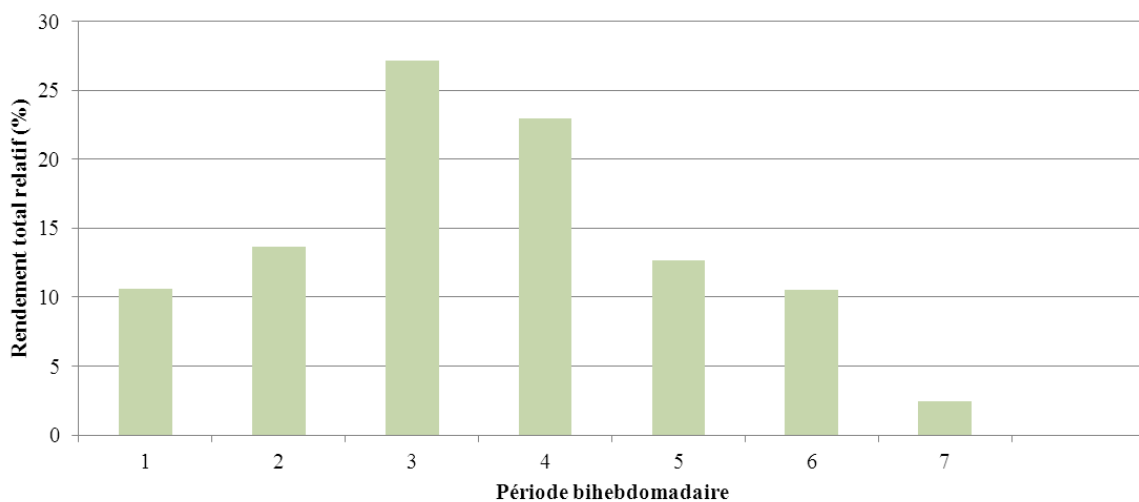


Figure 19. Rendement total relatif en fruits (poids) selon la période en 2011, tous traitements confondus.

Les rendements de 2010 sont présentés à la Figure 20. On y observe que les parcelles qui ont reçu de l'engrais conventionnel au buttage ont bénéficié des apports de N par la fertigation. En effet, les plants qui ont reçu la dose N50 et N100 par fertigation ont produit près de 9 et 13 % plus de fruits ($P = 0,1072$ et $0,0174$) que ceux du traitement N0, respectivement. Toutefois, il n'y a eu aucune différence entre les niveaux N50 et N100 de fertigation. Cela indique qu'il n'y a pas eu de gain significatif à utiliser la dose la plus élevée lors de cette saison. En ce qui a trait à l'engrais organique, aucune différence significative n'a été observée entre les différentes doses de

N apporté par la fertigation. De plus, il est intéressant de noter que les rendements obtenus avec l'engrais organique, dont une partie doit être minéralisée, ne sont pas significativement différents des ceux obtenus avec les deux autres types d'engrais utilisés à l'implantation et ce, même en absence de fertigation. Ainsi, bien que ce type d'engrais ait donné le plus de cymes et de nouvelles fleurs, cela ne s'est pas traduit par des rendements plus élevés. Une explication probable tiendrait au fait que les sols de fraisière sont traités pour contrer les agents pathogènes du sol. Du même coup, les microorganismes bénéfiques sont aussi inactivés, créant probablement un délai dans la libération du N par la minéralisation de l'engrais organique. Enfin, les réponses mesurées avec l'engrais à libération contrôlée vont, en quelque sorte, en sens inverse de celles observées pour l'engrais conventionnel. En effet, les rendements les plus élevés ont été obtenus avec la dose de fertigation N0 qui a permis de produire 4 et 12 % plus de rendements que ceux produits aux doses de fertigation N50 ($P = 0,1038$) et N100 ($P = 0,0607$). Ainsi, l'ajout de N par la fertigation a peut-être contribué à créer une salinité trop élevée, mais cela demeure une hypothèse.

Ces différences de poids en fraises récoltées en fonction de la fertigation N (Figure 20) seraient attribuables à un nombre plus élevé de fruits produits selon les traitements. En effet, la distribution du nombre relatif de fruits selon le traitement, illustrée à la Figure 21, va dans le même sens que celle relative au poids. Ainsi, les traitements où les rendements (poids) sont les plus élevés, sont également ceux où un nombre plus élevé de fruits a été observé. Si la différence de poids était conséquence à un poids moyen supérieur en faveur des rendements plus élevés, aucune différence n'aurait été observée entre les doses de fertigation pour un même engrais de départ. Donc, ces résultats suggèrent que davantage de fruits ont été produits par les fraisiers où les rendements étaient les plus élevés.

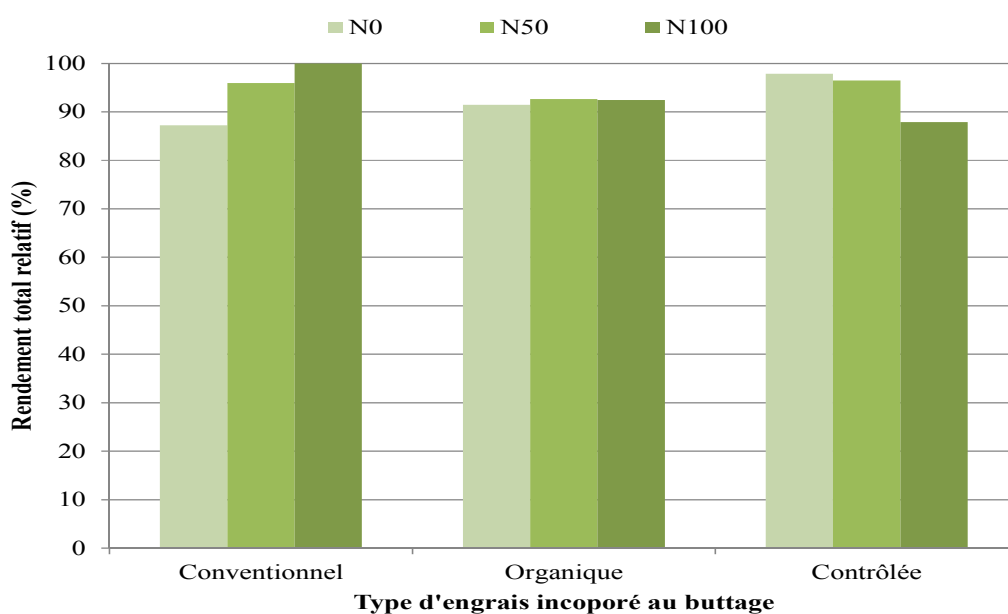


Figure 20. Rendement total relatif en fruits (poids) selon le type d'engrais à l'implantation et la dose de N appliqué par fertigation en 2010.

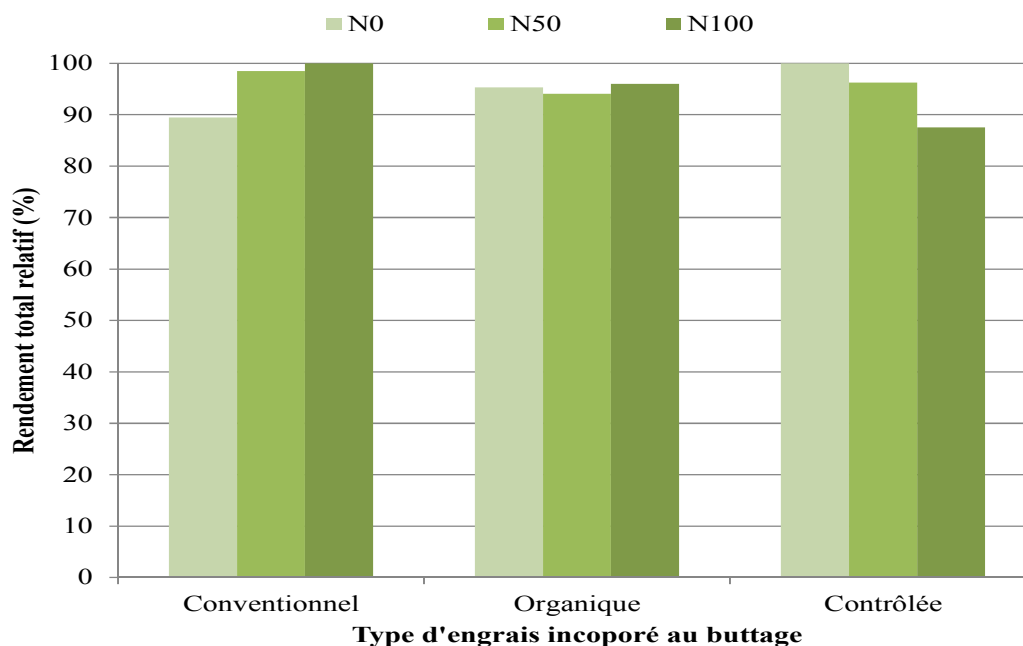


Figure 21. Rendement total relatif en fruits (nombre) selon le type d'engrais à l'implantation et la dose de N appliqué par fertigation en 2010.

En 2011, bien que la fertilisation n'ait pas eu d'impact au final sur les rendements totaux produits, le type d'engrais utilisé au buttage a eu un impact sur la production en fruits en tout début de saison. Ainsi, 18 et 24 % moins de poids totaux en fruits ont été produits lors de la 1^{ère} période de récolte bihebdomadaire avec les engrais organiques ($P = 0,0044$) et à libération contrôlée ($P = 0,0224$), comparativement à l'engrais conventionnel. Lors d'un printemps plus froid, la libération rapide du N de l'engrais conventionnel, très soluble et dont la libération en N ne dépend pas de la température du sol, semble donc avoir eu un impact positif. En 2010, année qui a connu un printemps chaud et hâtif, une telle différence n'a d'ailleurs pas été mesurée. Toutefois, cet effet a une portée limitée puisqu'au final, des rendements totaux similaires ont été récoltés en 2011, quelle que soit la fertilisation utilisée. Ce résultat final est probablement dû au fait que les engrais organiques et à libération contrôlée se sont rattrapés plus tard en saison. En effet, lors de la 5^e période bihebdomadaire, des rendements 13 et 17% plus élevés ont été observés pour l'engrais organique ($P = 0,1713$) et à libération contrôlée ($P = 0,0766$), respectivement, comparativement à celui de l'engrais conventionnel.

Ainsi, si en 2010, saison plus productive, la fertilisation a fait une différence au niveau des rendements obtenus, ce n'est pas le cas en 2011. Un ou des facteurs limitatifs, fait en sorte que la culture n'a pas pu tirer pleinement profit de la fertilisation, semblent donc avoir eu un impact plus fort sur les rendements que celui de la fertilisation.

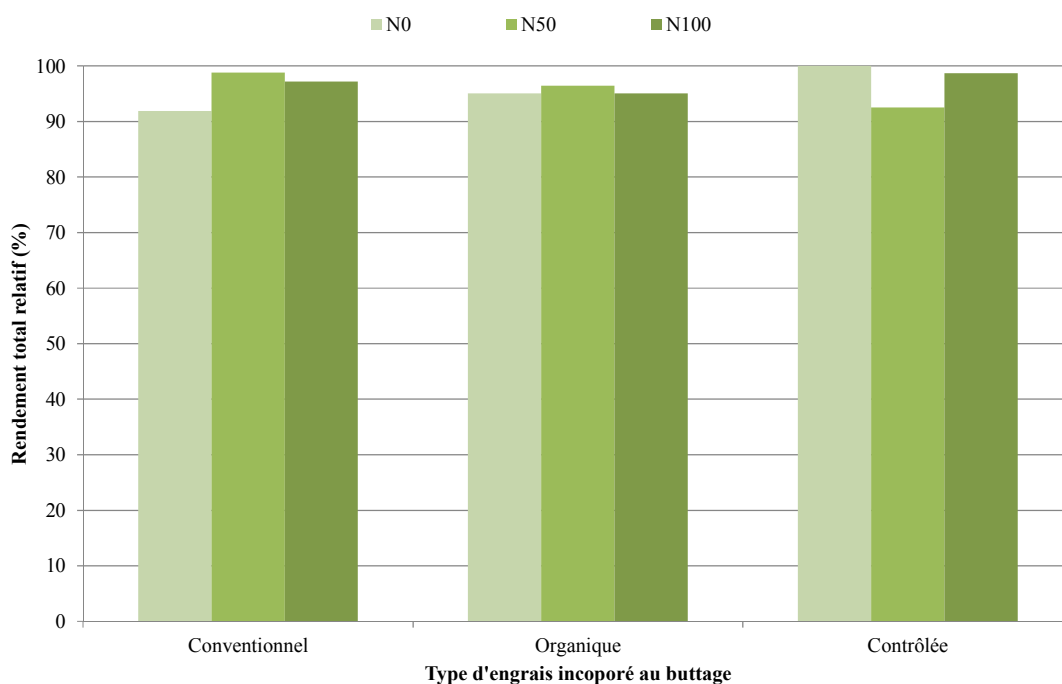


Figure 22. Rendement total relatif en fruits (poids) selon le type d'engrais à l'implantation et la dose de N appliqué par fertigation en 2011.

4.2 Éléments nutritifs et activité biologique du sol

4.2.1 Contenus en éléments nutritifs du sol dans la butte en saison

Les mesures de N-NO₃ disponibles dans la strate utile de sol vont dans le même sens que certaines hypothèses soulevées dans les sections précédentes (Figure 23 et Figure 24). Ainsi, il semble bien que l'engrais organique ait connu un certain retard de minéralisation, conduisant à un relâchement plus actif du N-NO₃ plus tard en saison, tel que le suggérerait le nombre moyen de nouvelles feuilles et cymes par plants. Le phénomène s'observe particulièrement en 2011, saison où le sol a mis plus de temps à se réchauffer (Figure 24). Ainsi, en 2010, lors de la mesure du 23 août, le sol des buttes ayant reçu l'engrais organique tendait à avoir une teneur en N-NO₃ 14 % plus élevée que celles des sols fertilisés avec l'engrais conventionnel et à libération contrôlée (Figure 23). En 2011, l'interaction devient significative entre le type d'engrais mis au buttage et la période de mesure (Type x Période à $P = 0,0218$). Ainsi, au 18 août, le sol des buttes ayant reçu l'engrais organique présentait des teneurs en N-NO₃ 108 et 42 % plus élevées que celles des sols fertilisés avec l'engrais conventionnel et à libération contrôlée, respectivement (Figure 24). De plus, tel que mentionné pour les rendements plus élevés mesurés lors de la première période de récolte en 2011, lors du premier dosage SSE du 15 juillet, les sols fertilisés avec l'engrais conventionnel avaient des teneurs en N-NO₃ 84 et 124 % plus élevées (FP, $P = 0,0573$; LC, $P = 0,0271$) que celles des sols fertilisés avec l'engrais organique et à libération contrôlée, respectivement, qui sont tous deux influencés par la température du sol quant à leur relâchement de N (Figure 24).

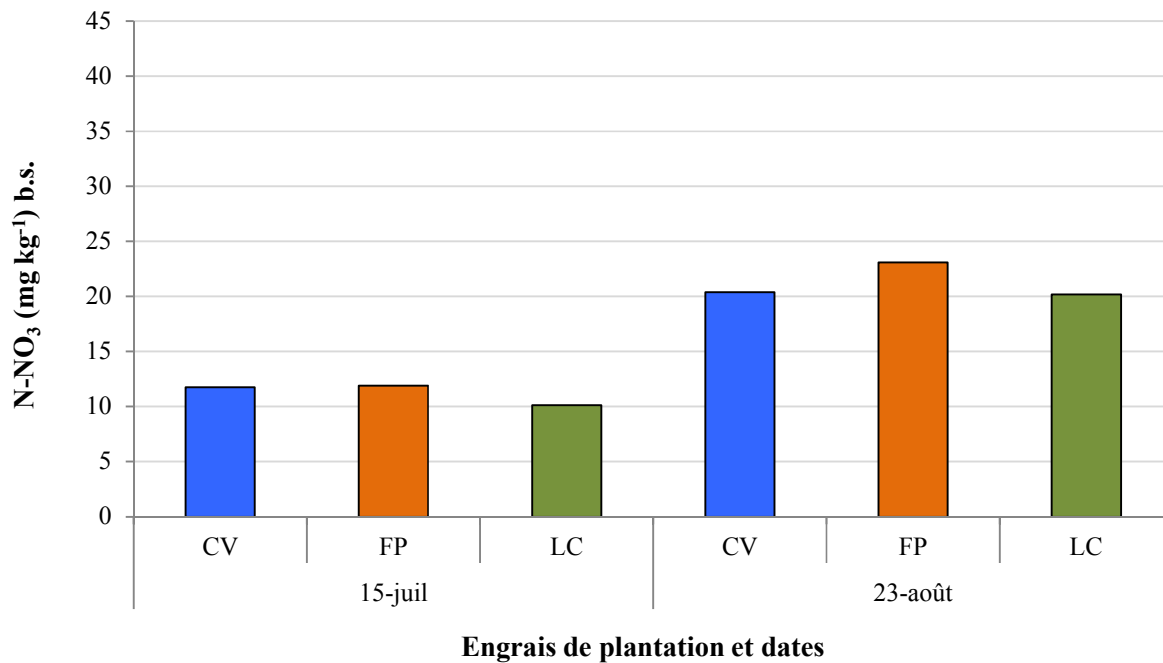


Figure 23. Contenus en nitrates du sol des buttes (méthode SSE) selon le type d'engrais de départ en saison, été 2010.

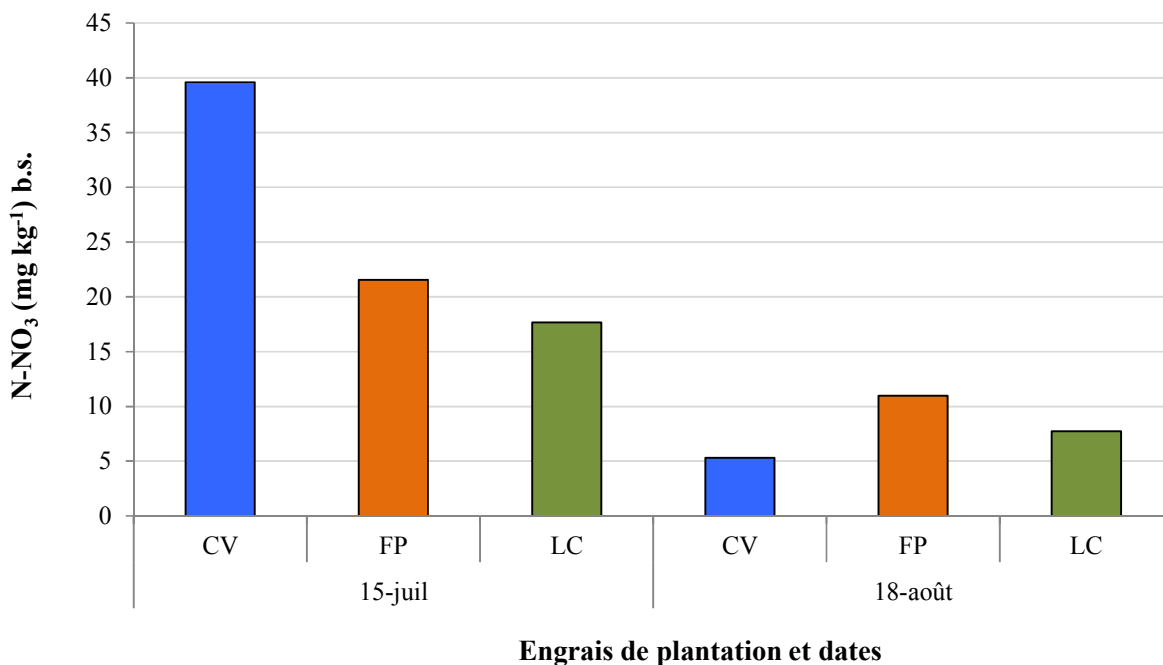


Figure 24. Contenus en nitrates du sol des buttes (méthode SSE) selon le type d'engrais de départ en saison, été 2011.

En ce qui a trait aux mesures de N-NH₄ disponibles, aucune différence significative n'a été mesurée les deux années. Ainsi, les teneurs en cet élément demeurent similaires entre les traitements et dans le temps. De plus, les valeurs de N-NH₄, très faibles (valeur moyenne de 0,17 mg kg⁻¹ b.s.) sont très en deçà de celles mesurées pour le N-NO₃, suggérant que la nutrition des fraisiers repose principalement sur la disponibilité en N-NO₃.

4.2.2 Flux *in situ* de N-NO₃ et N-NH₄ dans la butte au cours de la saison

Le suivi *in situ* du N-NO₃ et du N-NH₄ du sol de la butte corrobore les données obtenues par les extractions SSE et illustrent bien, tout d'abord, que le N-NO₃ est la forme prédominante de N minéral dans la butte. En tout temps, le N-NH₄ n'est présent qu'en très faibles quantités, comparativement au N-NO₃. La valeur moyenne des flux de N-NH₄ est en effet de 0,06 µg cm⁻² période⁻¹ sur les deux saisons, ce qui est très faible, comparativement à un intervalle de valeurs allant de 17 à 238 µg cm⁻² période⁻¹ pour les flux de N-NO₃. Conséquemment, l'impact que peut avoir la fertilisation sur la productivité de la culture semble effectivement passer par la hausse de disponibilité en N-NO₃ du sol. Autre constat général, les flux de N-NO₃ sont beaucoup plus bas (2 à 5 fois moins) en 2010, qu'en 2011, bien que la fertilisation ait été la même. Ceci est probablement dû aux prélèvements plus importants de N par la culture en 2010. En effet, dans le sol, la MEI mesure la résultante entre le prélèvement en N par les racines et la mise en disponibilité du N dans le sol. Pour une même mise en disponibilité, les flux résiduels seront donc plus bas en présence d'un prélèvement plus intense.

Globalement sur la saison, les flux de N-NO₃ tendent à décroître après une hausse suivant le début de la fertigation. Ainsi, en 2010, les flux mesurés avec l'application de la dose N100 augmentent légèrement suivant le début de la fertigation (10%, au 15 juillet), se maintiennent par la suite jusqu'à la mi-août, pour ensuite diminuer doucement à partir du changement de dose fertiguée et de façon plus marquée suivant l'arrêt de la fertigation. En 2011, une situation similaire se produit, mais de façon beaucoup plus marquée. Ainsi, avec l'apport de la dose N100, les flux de N-NO₃ doublent avec le début de la fertigation, se maintiennent au-dessus des 200 µg cm⁻² période⁻¹ jusqu'à la mi-septembre malgré une légère baisse à partir du changement de dose fertiguée, puis chutent de moitié lors de l'arrêt de la fertigation. Dans le cas des sols ne recevant aucun apport de N fertigué (N0), en 2010, les valeurs de flux de N-NO₃ déclinent sur toute la saison, au fur et à mesure que la fourniture en N des engrais appliqués au buttage s'épuise. En 2011, les flux de N-NO₃ semblent bénéficier un peu plus longtemps de la fertilisation printanière, mais décroissent ensuite sur le reste de la saison. En fait, une fois les prélèvements en N plus intensifs débutés (mi-juillet à mi-août), les flux de N-NO₃ mesurés dans les parcelles N0 s'abaissent fortement, contrairement à ceux dans les parcelles N100. Pour ce qui est de la dose intermédiaire (N50) testée, les valeurs oscillent entre celles des deux autres traitements.

Conséquemment, le type d'engrais utilisé à l'implantation n'a eu aucune influence significative sur les flux de N-NO₃, même l'engrais à libération contrôlée, les deux années, contrairement à la dose fertiguée de N qui a les fortement influencés, en interaction avec la période de mesure (Tableau 7). Ceci indique que c'est la fertigation qui influence les flux de N-NO₃ disponible dans la solution du sol. La fertigation remplit donc son rôle premier, i.e. qu'elle maintient bel et bien le niveau de N disponible au prélèvement par le fraisier dans la solution du

sol de la butte. De plus, l'effet des doses de N fertigué semble constant dans le temps, d'une année à l'autre. Premièrement, les mêmes sources de variation (dose de N fertigué et période de mesure, Tableau 7) ont un effet significatif les deux années, bien que ces deux saisons aient présenté des conditions climatiques très différentes. Deuxièmement, à chaque année, les flux de N-NO₃ mesurés dans les parcelles avant le début de la fertigation (1^{ère} période) sont similaires (Figure 25 et Figure 26) entre les traitements. Ceci concorde avec le fait que le type d'engrais utilisé à l'implantation n'a pas influencé les flux de N-NO₃. Ainsi, ce n'est qu'une fois la fertigation débutée, que les courbes de N-NO₃ se distancent. Enfin, à chaque année, l'application de la dose N100 permet de maintenir les flux de N-NO₃ 1,4 fois plus élevés que ceux mesurés dans les sols non fertigués en N (N0), en moyenne, durant la période de début de production (début juillet). De même, à chaque année, l'application de la dose N100 permet par la suite de maintenir en août et septembre les flux de N-NO₃ de 2 à 2,4 fois plus élevés que ceux mesurés dans les sols non fertigués en N (N0).

L'importante hausse des flux de N-NO₃ avec la fertigation N100 pourrait expliquer le meilleur rendement des plants fertilisés avec l'engrais conventionnel à cette dose. Ainsi, l'apport de N par fertigation en saison a pu compenser une partie du N de l'engrais granulaire probablement lessivée en début de saison alors que le prélèvement en N des plants est peu présent. Inversement, cette dose a aussi pu créer trop de salinité dans les sols contenant le fertilisant à libération contrôlée qui semble avoir bien joué son rôle en permettant l'atteinte de hauts rendements en absence de fertigation, alors que les plus bas rendements ont été récoltés dans le traitement N100.

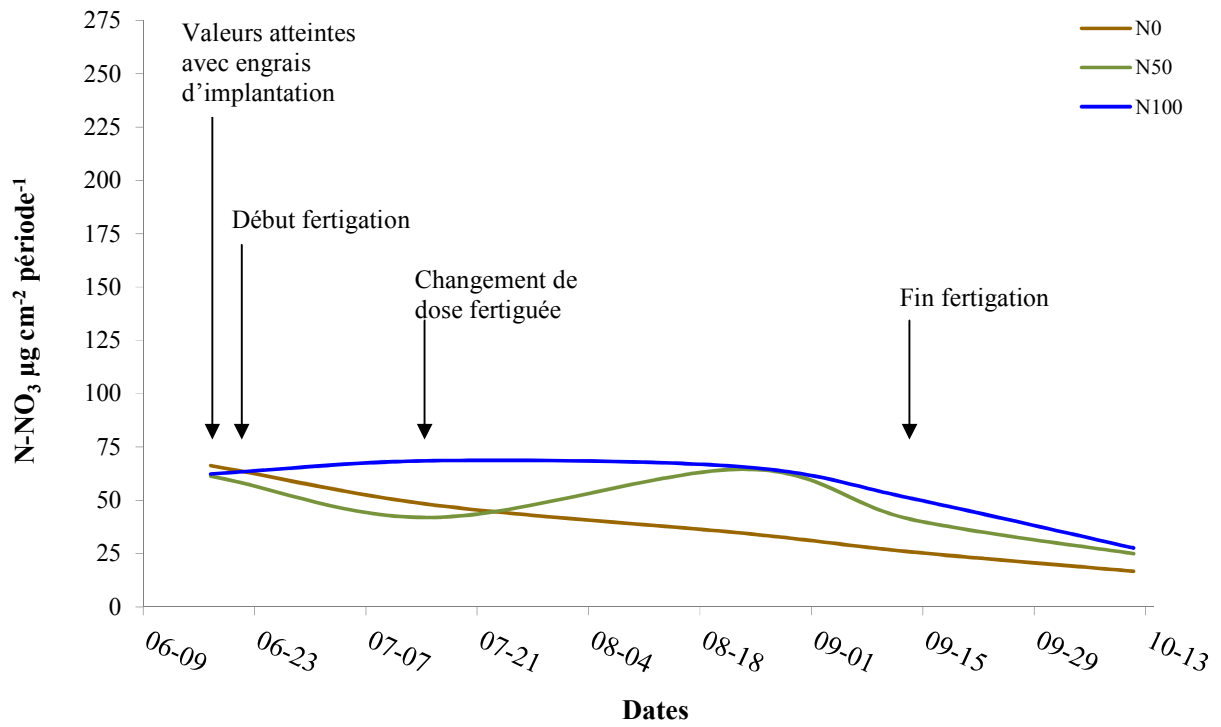


Figure 25. Flux *in situ* de N-NO₃ dans la strate utile de sol en cours de saison, été 2010.

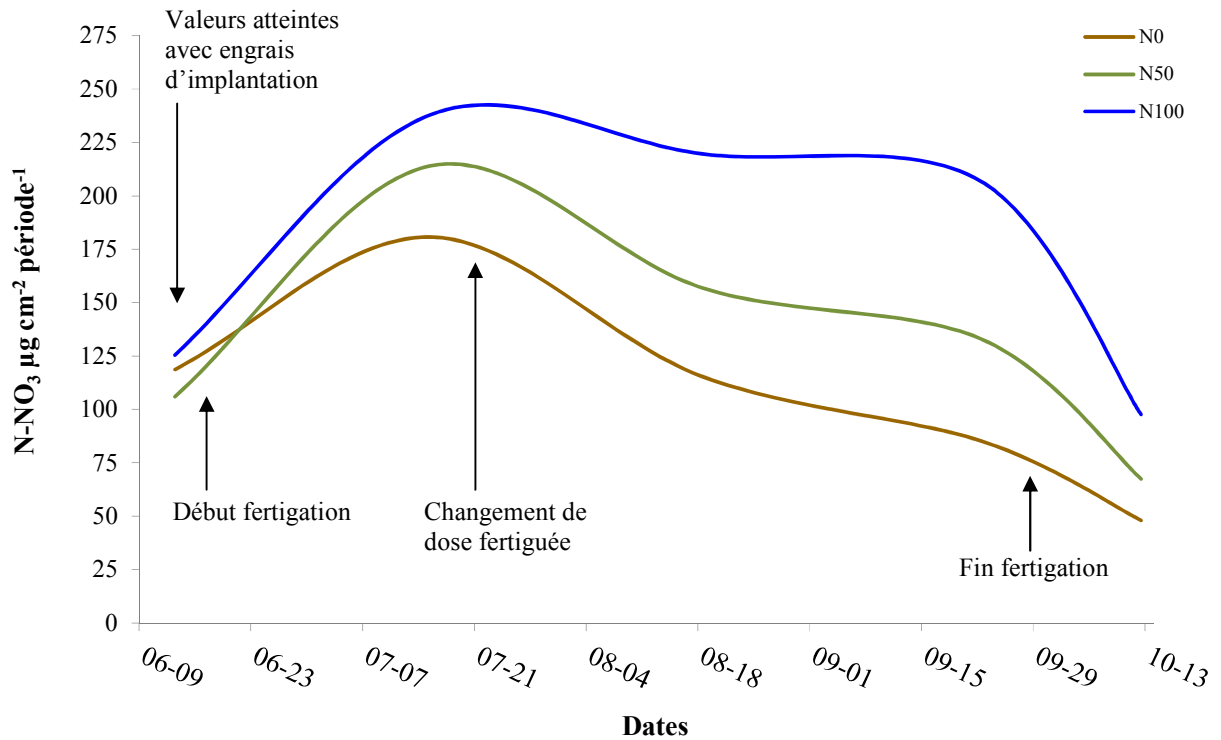


Figure 26. Flux *in situ* de N-NO₃ dans la strate utile de sol en cours de saison, été 2011.

Tableau 7. Analyses statistiques de l'impact du type d'engrais et des doses fertiliguées de N sur les flux de N-NO₃, été 2010 et 2011.

Sources de variation	2010					2011				
Type d'engrais [†]	ns					ns				
Fertigation	**					***				
Type d'engrais x Fertigation	ns					ns				
Période	***					***				
Période x Type d'engrais	ns					ns				
Période x Fertigation	*					**				
Période x Engrais x Fertigation	ns					ns				

Périodes [‡] :	17 juin	15 juil.	23 août	13 sept.	11 oct.	13 juin	15 juil.	18 août	22 sept.	12 oct.
N0 vs N-	ns	ns	**	**	ns	ns	(0,1323)	(0,0620)	*	ns
N- vs N+	ns	***	ns	(0,0960)	ns	ns	ns	**	***	ns
N0 vs N+	ns	**	**	***	ns	ns	*	***	***	*

[†] Niveau de signification de l'analyse de variance : *, **, ***, ns indiquent significatif à $P \leq 0,05, 0,01, 0,001$, et non significatif, respectivement.

[‡] Comparaison des moyennes par la différence des moindres carrés selon la dose de N fertiligué [dose eau seul (N0), 50% de la dose (N50), 100% de la dose (N100)] par période de contact.

4.2.3 *Activité biologique du sol dans la butte en saison*

En accord avec les mesures de rendements et de disponibilité en N du sol, de faibles taux d'activité biologique ont été mesurés dans le sol des buttes, diminuant ainsi l'expression du plein potentiel fertilisant des engrais organique. En effet, les mesures de taux respiratoire, reflétant le taux d'activité biologique des sols, s'avèrent très faibles dans tous les traitements. Statistiquement, ni le type d'engrais au buttage, ni la fertigation n'ont induit de différences significatives, donnant ainsi des valeurs moyennes de 0,08 mg et 0,21 mg CO₂ g⁻¹ sol (b.s.) en 2010 et 2011, respectivement. De même, les mesures d'activité uréase, responsable de la minéralisation du N organique, n'ont présenté aucune différence en fonction du type d'engrais de départ, ni en fonction de la fertigation, avec des valeurs moyennes de 14 et 21 µg N-NH₄ g⁻¹ sol (b.s.) en 2010 et 2011, respectivement. Pourtant, l'ajout de matière organique très fermentescible, via l'apport de carbone (C) très labile contenu dans l'engrais organique (FP), aurait dû produire une hausse marquée du taux respiratoire des sols.

4.3 **Azote résiduel du sol**

4.3.1 *Contenu en N_{tot} du sol dans la butte en post-récolte*

L'analyse du contenu en N total dans la butte de sol en post-récolte révèle que beaucoup plus de N résiduel est présent en 2011, année où les prélèvements en N ont été de beaucoup inférieurs à ceux de 2010 et la fertilisation plus élevée (Figure 27 et Figure 28). Ainsi, selon les valeurs moyennes en N_{tot}, la teneur en N résiduel est de 18 % plus élevée en 2011, comparativement à 2010, année où les prélèvements en N ont été 32% plus importants. De plus, alors qu'en 2010 les teneurs en N_{tot} post-récolte sont sous les valeurs mesurées au printemps, en 2011, elles leur sont supérieures.

En ce qui a trait à l'impact de la fertilisation, les analyses de 2010 semblaient suggérer que davantage de N résiduel était présent dans les sols ayant reçu des engrais organiques, en accord avec le fait que la faible activité biologique des sols n'ait pas permis d'exploiter pleinement ce type d'engrais, qui plus est n'est pas lessivable sous sa forme organique et donc plus susceptible de demeurer dans la couche supérieure de sol. Dans cet ordre d'idée, en absence de fertigation, peu de reliquats de N étaient présents dans les sols fertilisés avec l'engrais conventionnel, très lessivable. De plus, dans le cas des sols fertilisés avec l'engrais conventionnel, ceux-ci semblaient avoir plus de N résiduel suivant une fertigation en N plus élevée dans la saison. Toutefois, selon les analyses statistiques, ces différences ne sont pas significativement différentes ($P = 0,3095$). En 2011, les sols ayant reçu la dose de fertigation N100 semblaient contenir plus de N résiduel, mais encore là, les analyses statistiques indiquent que ces différences ne sont pas significatives ($P = 0,2332$).

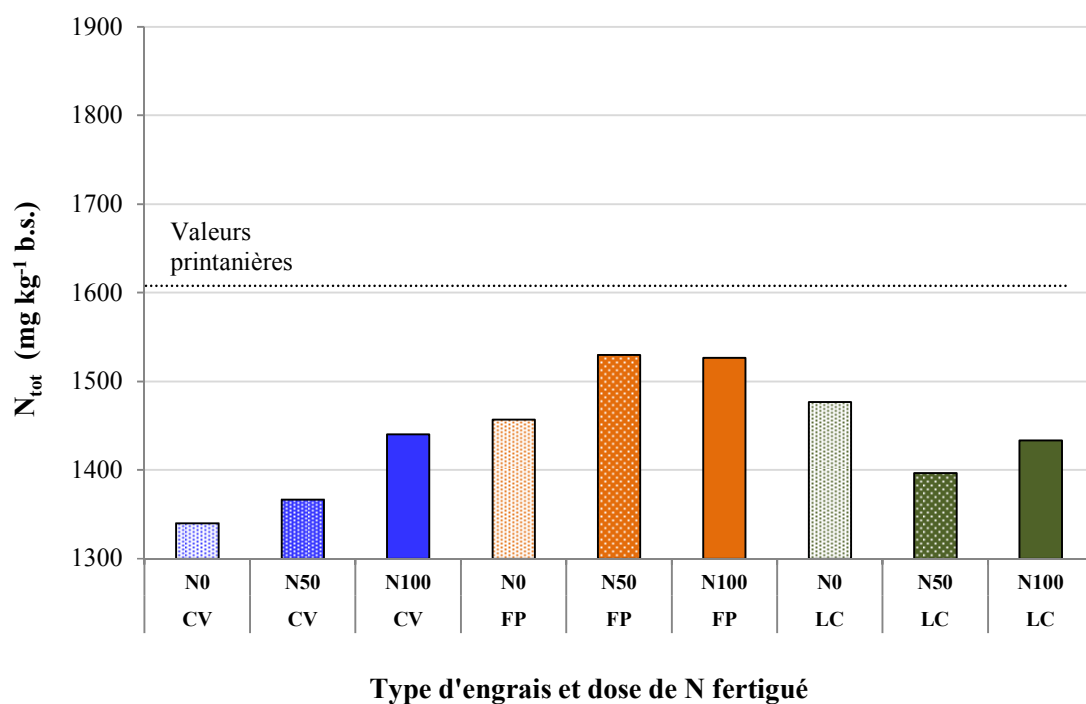


Figure 27. Contenu automnal post-récolte en N_{tot} de la strate de sol 0-30 cm selon le type d'engrais de départ et la dose fertiliguée de N, saison 2010.

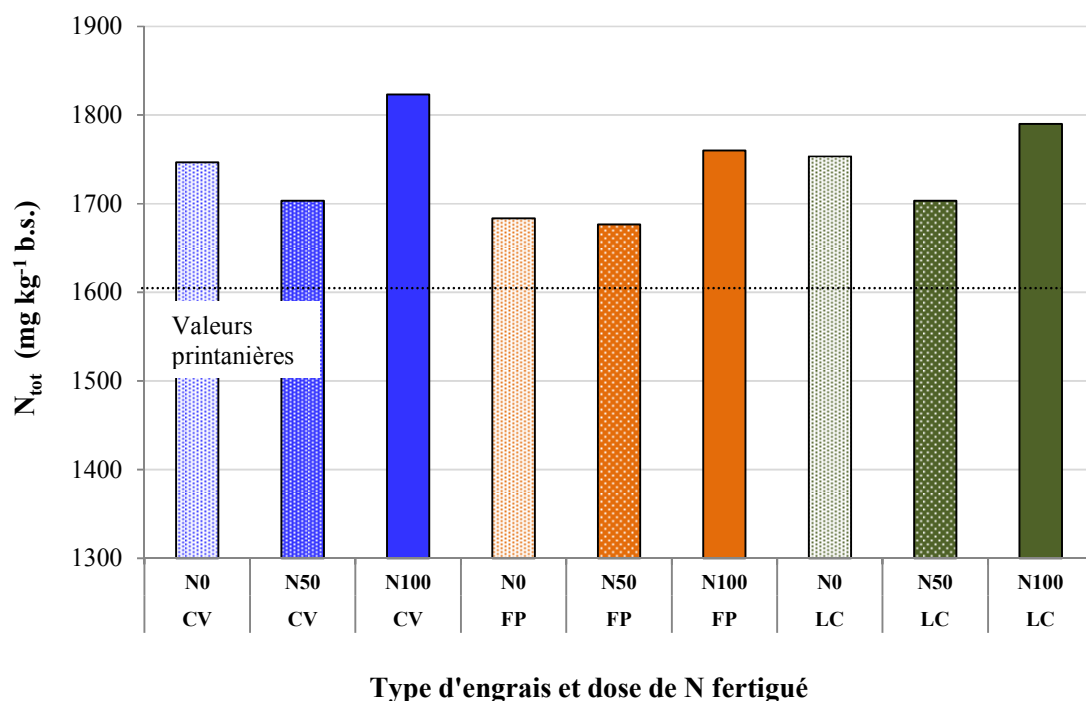


Figure 28. Contenu automnal post-récolte en N_{tot} de la strate de sol 0-30 cm selon le type d'engrais de départ et la dose fertiliguée de N, saison 2011.

4.3.2 Répartition des teneurs en nitrates dans la butte de sol en post-récolte

Le suivi des reliquats de N a aussi été effectué avec la détermination de la distribution des teneurs en N-NO₃ dans le profil de la butte. Le suivi de la forme nitrate de l'azote est particulièrement intéressant, car cette forme de N est très sensible aux diverses régies qui peuvent être employées. D'une part, elle est présente en beaucoup moins grande quantité que le N total (N minérale + N organique) et il faut donc des variations moins importantes pour distinguer des différences significatives. D'autre part, c'est la forme de N la plus susceptible d'être lessivée puisque le N-NO₃ n'a pas la propriété de se fixer aux particules de sol, contrairement aux N-NH₄. Il s'agit donc d'une mesure environnementale pertinente puisque le N-NO₃ se retrouve facilement entraîné avec le mouvement de l'eau au travers du profil de sol.

La représentation graphique des distributions de N-NO₃ dans la butte selon les divers traitements de fertilisation illustre clairement que les reliquats de N-NO₃ ne sont pas répartis de façon homogène dans la butte et qu'ils diffèrent entre les traitements. Les analyses de la saison 2010, représentées à la Figure 29, font bien ressortir qu'il y a une concentration très importante de N-NO₃ au sommet de la butte et au pourtour. Comparativement à la teneur en N-NO₃ du sol avant fertilisation au printemps qui équivaut à environ 4 mg kg⁻¹ sol (b.s.), ces zones contiennent des valeurs extrêmes allant jusqu'à 186 et 113 mg kg⁻¹ sol (b.s.). Cette accumulation en nitrates pourrait peut-être s'expliquer par la création d'un phénomène de pompage par condensation, dû au changement des températures près du plastique. Par ailleurs, cette richesse pourrait aussi découler du fait qu'il a été prouvé que ces zones demeurent sèches, malgré la pratique de l'irrigation. En effet, selon une étude utilisant un découpage similaire du sol, les coins supérieurs droit et gauche (zones 11 et 14) des buttes de fraisier irrigué présentent un assèchement important du sol et les zones latérales (zones 1, 2, 5, 6, 7 et 10) subissent un assèchement partiel (Boivin et Deschênes, 2011). En conséquence, bien que de l'engrais soit présent, celui-ci ne peut être prélevé par les racines et demeure en place. D'une part parce que le prélèvement du N-NO₃ par les racines est non spécifique et se fait via l'absorption de l'eau et d'autre part, parce qu'en présence d'une teneur inadéquate en eau, le développement des racines est limité. À l'opposée, au centre de la butte, particulièrement du côté du plant, le sol semble avoir été vidé de son contenu en N-NO₃. Cette déplétion peut découler du prélèvement en N par les racines des plants, mais peut aussi être consécutive à un entraînement du N-NO₃ par la descente de l'eau d'irrigation au travers de la butte. En effet, toujours selon une étude de Boivin et Deschênes, 2011, les deux zones directement sous le plant (zones 9 et 13) sont celles où la densité racinaire est la plus élevée. Cependant, c'est aussi ces zones qui correspondent au cône d'humectation créé par le goutteur, laissant présager d'un certain lessivage des nitrates.

Il semble aussi que l'application de la dose N100, comparativement à la dose N0, ait laissé plus de N-NO₃ résiduel. Cette situation ressort les deux années, mais encore plus particulièrement en 2011, saison où les prélèvements ont été réduits et pour laquelle les mesures effectuées avec les MEI démontraient déjà une richesse *in situ* plus importante en N-NO₃, non seulement en saison, mais également lors du démantèlement du dispositif à la mi-octobre (Figure 30).

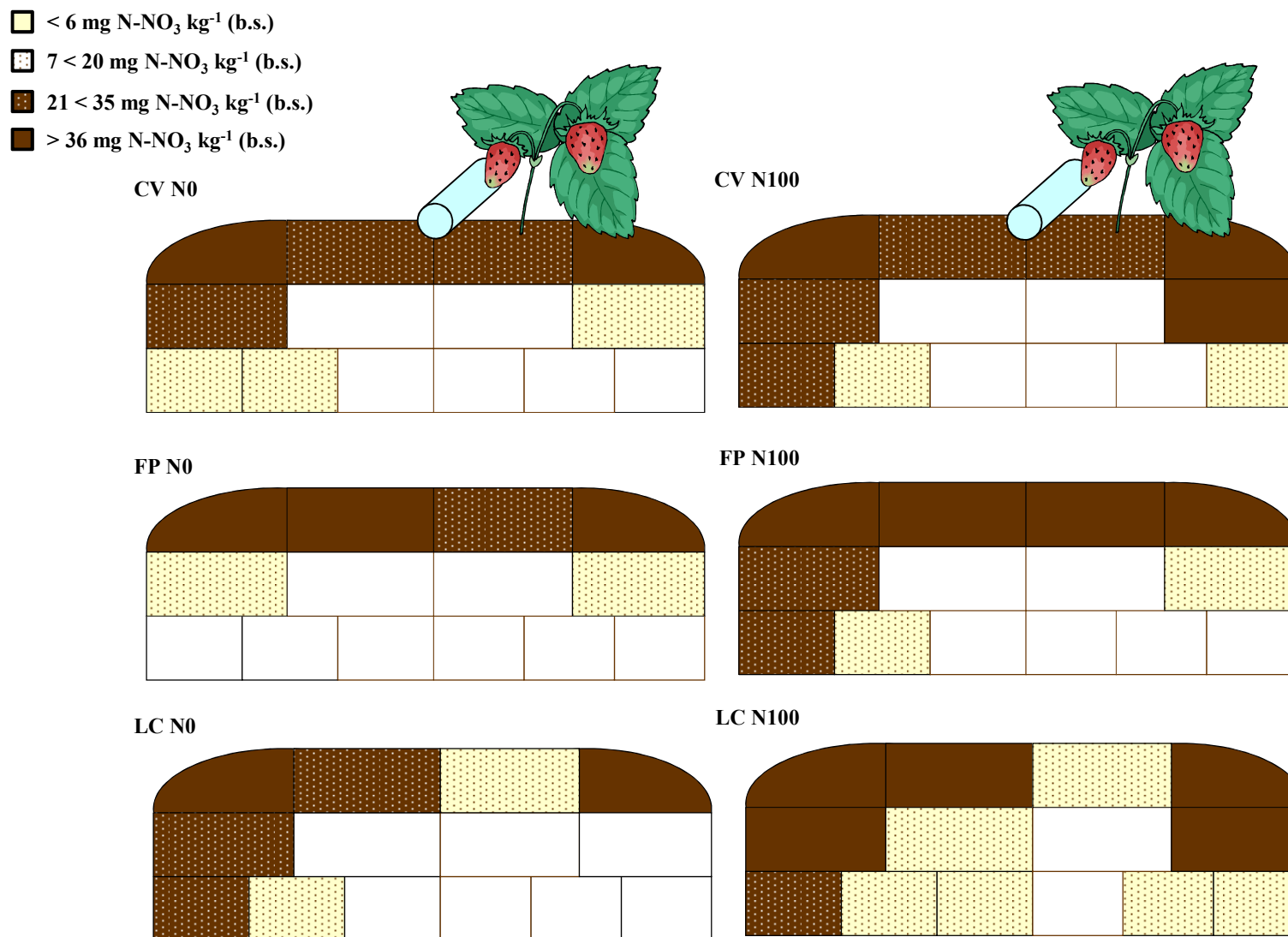


Figure 29. Répartition des teneurs en N-NO₃ dans la butte de sol à l'automne selon le type d'engrais de départ et la dose de N fertilisé, saison 2010.

- < 6 mg N-NO₃ kg⁻¹ (b.s.)
- 7 < 20 mg N-NO₃ kg⁻¹ (b.s.)
- 21 < 35 mg N-NO₃ kg⁻¹ (b.s.)
- > 36 mg N-NO₃ kg⁻¹ (b.s.)

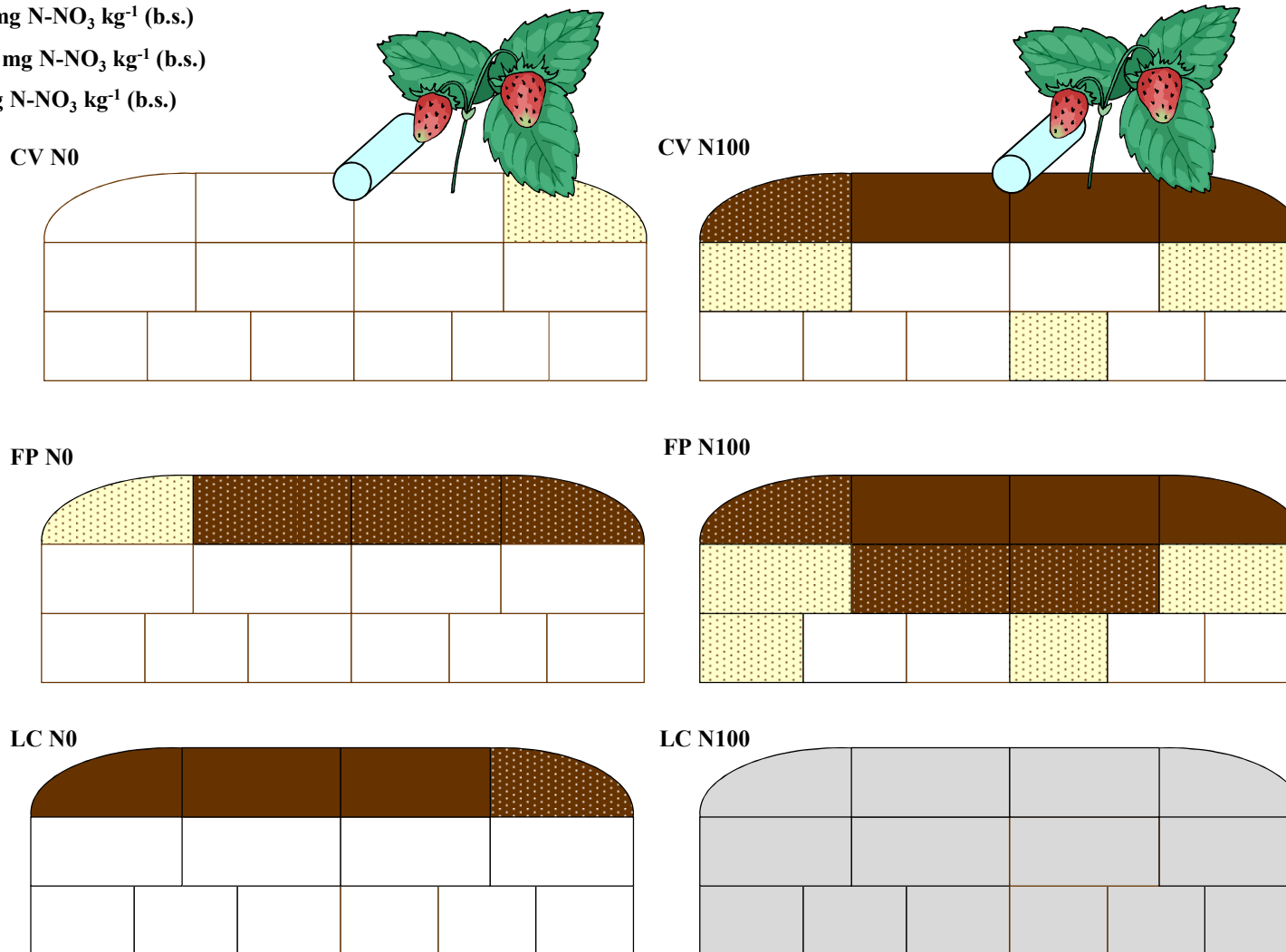


Figure 30. Répartition des teneurs en N-NO₃ dans la butte de sol à l'automne selon le type d'engrais de départ et la dose de N fertilisé, saison 2011. Le traitement LCN100 n'a pu être analysé.

Finalement, il semble que davantage de N-NO₃ soit demeuré dans les buttes ayant reçu l'engrais à libération contrôlée. Cette situation pourrait être reliée à l'évolution des températures dans la butte de sol, puisque cet engrais demande 120 jours de 24 heures à 21°C pour relâcher au complet le N contenu dans les granules. En effet, selon le suivi des températures effectué dans les zones de la butte en 2011, le nombre nécessaire de jours cumulés à 21°C n'est pas tout à fait atteint sur la saison (Figure 31). Toutefois, il s'en approche, avec 90 jours cumulés à $\geq 19^\circ\text{C}$, mais il demeure que l'accumulation ralentit dès le 30 août, pour se terminer le 27 septembre. Par ailleurs, si l'on se réfère au nombre de jours cumulés à $\geq 24^\circ\text{C}$, il existe une grande différence entre les zones du dessus, du milieu et du bas de la butte. Ainsi, il se crée un délai d'attente important dans les zones inférieures de la butte. En effet, dans les zones du fond (ligne bleue), le premier jour cumulé à $\geq 24^\circ\text{C}$ n'est atteint que le 5 juillet. De plus, à partir du 6 août, aucun jour cumulé supplémentaire ne s'additionne. Il n'y a donc qu'une période de 1 mois sur la saison où les zones du fond accumulent des jours à $\geq 24^\circ\text{C}$. En comparaison, dans les zones du dessus (ligne rouge), le premier jour cumulé à $\geq 24^\circ\text{C}$ est atteint dès le 5 juin, et l'accumulation perdure jusqu'au 2 septembre, donc sur une période totale de 89 jours. Conséquemment, il semble qu'il serait préférable, pour tirer pleinement profit de la technologie des engrais à libération contrôlée, d'effectuer un placement stratégique de ceux-ci. Le plus judicieux serait d'effectuer le placement en bande dans les zones regroupant le meilleur compromis entre l'atteinte des températures, la disponibilité en eau et le développement racinaire (Figure 32). Cette idée pourrait également s'appliquer aux engrais conventionnels puisque ceux-ci sont lessivés facilement et que leur placement dans les zones présentant les meilleurs prélèvements ne peut être que bénéfique. Par ailleurs, l'utilisation d'un engrais avec un nombre de jours de libération inférieur à 120 pourrait également être envisagée.

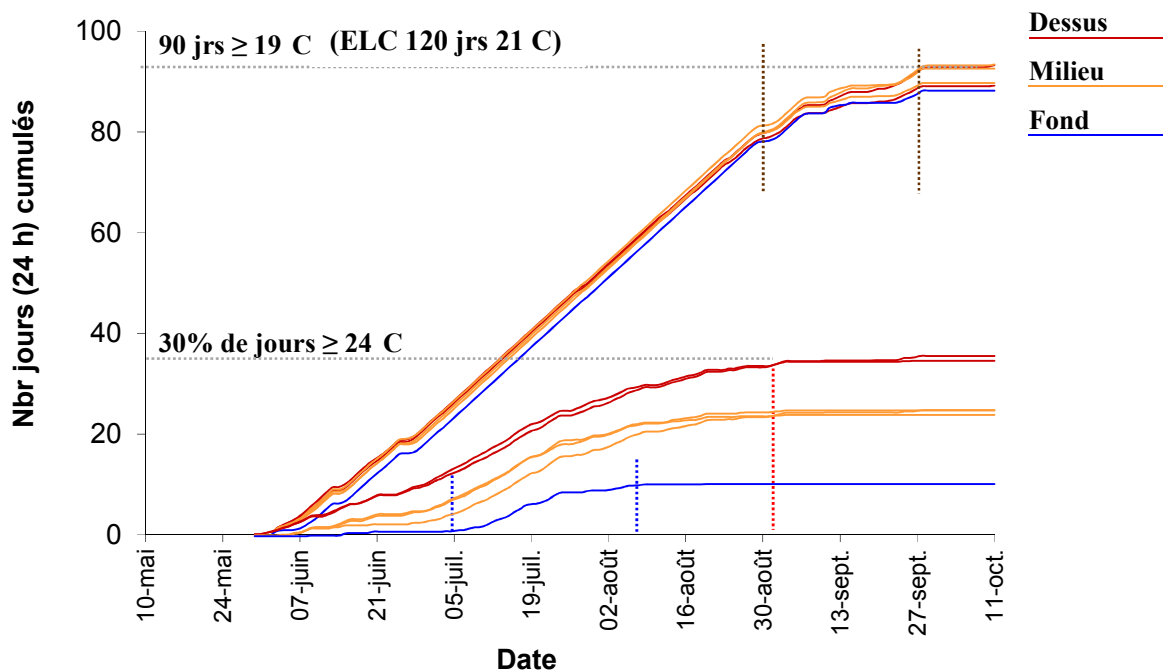


Figure 31. Nombre de jours cumulés où la température a atteint au moins 19°C dans le sol selon les zones de butte, saison 2011. N.B. Une pente de zéro signifie qu'il n'y a plus d'accumulation de jours à la température ciblée.

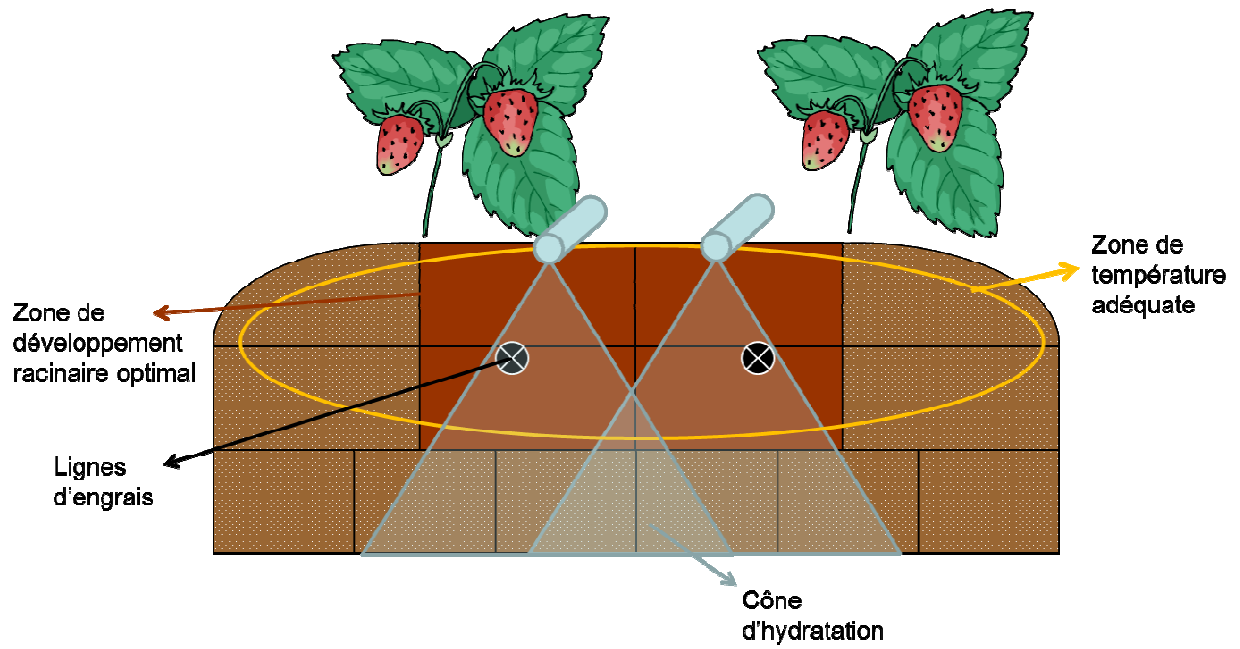


Figure 32. Hypothèse de placement en bande des engrais dans les buttes de culture de la fraise fertiguée à jours neutres.

4.4 Analyse économique

Selon les résultats agronomiques obtenus dans ce projet, les plants fertilisés avec l'engrais granulaire conventionnel et fertigués à 50 % de la dose (CVN50) et ceux ayant reçu de l'engrais organique (FPN0) ou de l'engrais à libération contrôlée (LCN0) sans fertigation azotée, ont produit les meilleurs rendements pour chacun des types d'engrais testés. De plus, ces rendements ne sont pas significativement différents entre les trois types d'engrais étudiés. Ainsi, chacun des types d'engrais a présenté une combinaison 'Type d'engrais x Fertigation' permettant d'atteindre le plus haut rendement. Ces trois combinaisons ont donc été comparées dans le cadre de l'analyse économique qui suit.

Le coût de fertigation retenu pour l'analyse est de 50 \$ par épisode de fertigation, soit le coût des épisodes dans ce projet. Ce coût diverge de celui présenté dans les Références économiques CRAAQ (CRAAQ, 2007), mais cette référence précise que «les engrais mentionnés le sont à titre indicatif», tandis que les coûts assumés dans ce projet résultent principalement du mélange d'engrais utilisé, très représentatif de ce qui est choisi également par les producteurs. Cette valeur a donc été retenue. Par ailleurs, pour ce qui est du prix des engrais appliqués au buttage, étant donné que les prix du marché sont sujets à changements d'une année à l'autre, c'est le prix moyen des trois dernières années (2009 à 2011) des différents fertilisants qui a été employé (CRAAQ, 2011). Enfin, pour le calcul des coûts par kilo de fraises vendues, le rendement de référence (CRAAQ, 2007) a été utilisé afin de transposer les résultats au contexte de production.

Sur cette base, l'utilisation du traitement CVN50 a entraîné des coûts de 696 \$ ha⁻¹, comparativement à 984 \$ ha⁻¹ pour le FPN0 et 1141 \$ ha⁻¹ pour le traitement LCN0. Au premier coup d'œil, les résultats économiques par hectare semblent donc favoriser le traitement CVN50. Toutefois, ce résultat est relativement trompeur. Tout d'abord, en utilisant les paramètres des *Références économiques* (CRAAQ, 2007), on constate que les coûts de fertilisation sont de 0,039 \$ kg⁻¹ de fraises vendues pour le traitement CVN50, de 0,055 \$ kg⁻¹ pour le FPN0 et de 0,063 \$ kg⁻¹ pour le LCN0. Ainsi, lorsque le coût est rapporté sur la base du volume de production, la différence est peu significative sur le plan économique entre les trois stratégies de fertilisation. De plus, cette différence de coût de fertilisation ne tient pas compte de deux éléments qui sont importants pour les producteurs. Premièrement, la fertigation comporte des coûts de gestion et de main-d'œuvre, absents des deux autres traitements non fertigués. Il est difficile d'estimer l'ampleur de ces coûts car il n'existe pas de données officielles sur le temps et le matériel alloués à cette opération par les producteurs dans la production de fraises à jours neutres. Toutefois, ils sont assurément non négligeables. Deuxièmement, il est possible que la fertigation présente un risque de variation des coûts, en cours de saison, selon certains impondérables, contrairement aux traitements LCN0 et FPN0 qui présentent l'avantage d'entraîner un coût fixé dès le début de saison. Ensuite, la fertigation comporte aussi un coût dit d'opportunité. C'est à dire que le temps alloué à la fertigation est autant de temps qui n'est pas alloué à d'autres opérations de culture ou de gestion qui sont plus rentables. Par exemple, la main-d'œuvre dans la production de fraises à jours neutres est un facteur de production prépondérant avec 40 % des coûts variables (CRAAQ, 2007). Le temps épargné à ne pas fertiguer permet alors une meilleure gestion de ce poste budgétaire beaucoup plus important que celui de la

fertilisation. Enfin, au cours des prochaines années, avec les efforts d'innovation consentis pour développer des engrais organiques et ELC accessibles, la différence de prix entre ces engrais et les engrais conventionnels pourrait connaître une diminution.

Par conséquent, avec des rendements en fruits comparables, les résultats agronomiques du projet, combinés aux références économiques en contexte de production, nous mènent à conclure que la fertigation n'offre pas de perspective de rentabilité suffisante et significative sur le plan économique pour les producteurs de fraises à jours neutres, considérant les gains potentiels liés à la simplification de la fertilisation. Ceci est d'autant plus vrai si l'on ajoute les gains environnementaux potentiels à ne pas fertiger, puisque ce projet a démontré que la fertigation résultait en des quantités de N résiduel plus élevées dans la butte.

5 CONCLUSION

Cette étude démontre que l'apport de N en saison par la fertigation hausse et maintient effectivement la disponibilité en N dans la butte de sol. Toutefois, selon les années, les bénéfices générés par le maintien de cette disponibilité varient. En effet, lors d'une année moins propice à la production, au cours de laquelle un ou des facteurs limitatifs, autre que la fertilisation, ont restreint la production, il n'y a pas eu de gain de rendements à fertiger. De plus, même au cours d'une saison présentant des conditions climatiques qui permettent à la culture de tirer pleinement profit de la fertilisation, les gains retirés de la fertigation azotée se sont avérés différents selon le type d'engrais utilisé au buttage et la dose de N fertigué. Ainsi, si la fertigation a profité aux rendements avec l'engrais conventionnel, elle n'a eu aucun impact lorsque jumelée avec l'utilisation d'engrais organique et à même nuire aux rendements dans le cas de l'engrais à libération contrôlée qui a produit ses meilleurs rendements en absence de fertigation N. De plus, dans le cas de l'engrais conventionnel, il n'y a pas eu davantage à utiliser 100 % de la dose recommandée de N, puisque la dose réduite de moitié a donné des rendements équivalents.

Les engrais à libération contrôlée semblent donc détenir le potentiel de remplacer les apports de N par fertigation par un relâchement progressif du N dans le temps. Cependant, selon l'analyse de la distribution du nitrate résiduel dans la butte en fin de saison et du suivi de la température du sol, son placement au buttage devrait être repensé pour en maximiser l'utilité. En effet, lorsque l'engrais est mélangé au hasard dans l'ensemble du volume de sol de la butte, les granules qui se retrouvent dans les zones les plus froides ne profitent pas de conditions assurant le relâchement complet du N disponible. Ainsi, l'application en bandes de l'engrais à libération contrôlée, dans la zone de butte offrant le meilleur compromis entre l'atteinte des températures, la disponibilité en eau et le développement racinaire, serait probablement à privilégier afin de maximiser les bénéfices pouvant être obtenus de cette technologie. De plus, un engrais demandant moins de jours cumulés aurait peut-être été plus adéquat.

De son côté, l'engrais organique a également présenté un potentiel intéressant puisqu'une production totale en fruits équivalente a été obtenue avec ou sans fertigation N, et que des rendements similaires à ceux produits avec les deux autres types d'engrais ont été obtenus. Toutefois, la valorisation de ce type d'engrais a été limitée par le faible niveau d'activité biologique du sol qui prévaut dans la butte. Un délai s'est donc créé dans la minéralisation du N organique en N minéral disponible à la plante, qui s'est traduit par un enrichissement plus tardif du sol en nitrates et à un départ plus lent dans la production de fruits, surtout lors de la saison la plus froide. L'application simultanée d'une certaine quantité d'engrais conventionnel comme démarreur lors du buttage permettrait peut-être de pallier à ce retard.

En conclusion ce projet s'articule autour de l'hypothèse suivante, à savoir que recourir à des engrais à libération contrôlée ou d'origine organique au buttage, en remplacement des engrais conventionnels, permettrait de réduire ou même d'éliminer la part d'azote apporté par la fertigation dans un programme de fertilisation. Maintenant, à savoir s'il est envisageable agronomiquement de diminuer ou d'éliminer les apports de N par la fertigation, la saison 2010 nous indique que oui. De plus, avec l'utilisation de l'engrais à libération contrôlée, pour des rendements en fruits comparables, l'analyse coûts/bénéfices conclut que la fertigation n'offre pas

de perspective de rentabilité significative pour les producteurs, considérant les gains potentiels liés à la simplification de la fertilisation. Ceci est d'autant plus vrai si l'on ajoute les gains environnementaux potentiels à ne pas fertiger, puisque ce projet a démontré que la fertigation résultait en des quantités de N résiduel plus élevées dans la butte. Toutefois, dans le cas où l'emploi de l'engrais à libération contrôlée serait choisi, son application en bandes, dans la zone de butte offrant le meilleur compromis entre l'atteinte des températures, la disponibilité en eau et le développement racinaire, serait à privilégier afin de maximiser les bénéfices pouvant être obtenus de cette technologie.

6 DIFFUSION DES RÉSULTATS

Conférences et cahiers de conférence

Landry, C. et C. Boivin. 2012. Performance des engrais à libération contrôlée et d'origine organique dans la fraise à jours neutres fertiguée.

Boivin, C. et C. Landry. 2011. Projets de recherche en cours menés par l'institut de recherche et de développement (IRDA). Journées provinciales sur la recherche. Université Laval, 14 décembre.

Boivin, C. et C. Landry. 2011. Survol des projets de recherche des dernières années à l'IRDA. Les journées horticoles. St-Rémi, 7 décembre.

Boivin, C. et C. Landry. 2011. Essais de fertigation, d'engrais organiques et d'engrais à libération contrôlée dans la fraise à jours neutres. Activité champ sur les innovations dans les petits fruits. Île d'Orléans, 15 juillet.

Landry, C. et C. Boivin. 2011. Essai comparatif des engrais commerciaux traditionnels, à libération contrôlée et d'origine organique dans la production de la fraise fertiguée à jours neutres. Journée horticole de l'Estrie. Sherbrooke. 9 mars.

Landry, C. et C. Boivin. 2011. Performance des fertilisants à libération contrôlée et d'origine organique dans la fraise à jours neutres fertiguée. 20^{es} Journées agricoles et agroalimentaires Montréal-Laval-Lanaudière. Saint-Charles-Borromée, 25 janvier.

Présentation du projet sur le site Internet de l'IRDA

<http://www.irda.qc.ca/fr/Liste-des-projets-en-cours/334>

Fiche informative présentant le projet

http://www.irda.qc.ca/_documents/_Results/216.pdf

Rapport final

Landry, C. et C. Boivin. 2012. Performance des engrais à libération contrôlée et d'origine organique dans la fraise à jours neutres fertiguée. Rapport final de recherche IRDA, projet n° PSIH10-1-355, 50 pages.

7 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Monsieur Louis et Monsieur Gabriel Gosselin de la Ferme François Gosselin pour leur précieuse collaboration au projet. Merci également à Mme Michèle Grenier de l'IRDA pour l'analyse statistique des données. Nous soulignons également la collaboration de l'Association des producteurs de fraises et framboises du Québec (APFFQ). Finalement, nous désirons remercier le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) pour avoir contribué au financement du projet par le biais du Programme de soutien à l'innovation horticole (PSIH).

8 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 1988. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). Québec. Agdex 533, méthode SS-1.

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2011. Fertilisants et amendements – Prix. AGDEX 540/855. CRAAQ. Juillet 2011. 1 page.

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2007. Fraise à jour neutre, Budget – AGDEX 232/821b. CRAAQ. Avril 2007. 5 pages.

Gee, G.W. et J.W. Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. *In* A. Klute (ed) Methods of soil analysis. Part 1. ASA. Monograph No 9. 2nd edition. Madison, WI.

Isaac, R.A. et Johnson, W.C. 1976. Determination of total nitrogen in plant tissues using a block digester. J. Ass. Off. Anal. Chem. 69:98-101.

Kandeler, E. et H. Gerber. 1988. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. Soil. Fert. Soils 6: 68-72.

Littell, R.C., G.A. Milliken, W.W. Stroup, R.D. Wolfinger et O. Schabenberger. 2006. SAS System for Mixed Models, second edition. Cary, NC : SAS Institute inc.

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario . 2012. [en ligne] <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/pub360/5strnutr.htm#tab58> (consulté en 2012).

Tran, T.S., M. Giroux, et A. N'Dayegamiye. 1992. Utilisation rationnelle des fumures azotées minérales : aspects agronomiques et environnementaux. Agrosol 5 (2):18-25.

Warncke, D. 2011. Recommended Test Procedures for Greenhouse Growth Media. *Dans* Ellis B. et J.R. Brown (eds) Recommended chemical soil test procedures for the North Central Region. Missouri Agricultural Experiment Station Publication, No.221, February 2011, chapter 13. Pages 61-64.