

Agriculture, Pêcheries
et Alimentation

Québec 

Programme de soutien à l'innovation horticole

Engrais à libération contrôlée : potentiel d'utilisation dans la
pomme de terre irriguée.

Projet n° PSIH 11-1-546



Rapport final

Mars 2011 à mars 2013

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

31 mars 2013

Équipe de réalisation

Christine Landry	Chercheure, IRDA
Carl Boivin	Chercheur, IRDA
Luc Belzile	Chercheur, économiste, IRDA
Julie Mainguy	Attachée de recherche, IRDA
Danièle Pagé	Technicienne agricole, IRDA
Stéphane Nadon	Technicien agricole, IRDA
Laurence Simard-Dupuis	Attachée de recherche, IRDA
Paul Deschênes	Professionnel de recherche, IRDA
Maxime Delisle-Houde	Attaché de recherche, IRDA
Michèle Grenier	Statisticienne, IRDA
Serge Bouchard	Technologue, conseiller horticole, MAPAQ – Bas St-Laurent
Annie Dumas	Agronome conseil, CARN

TABLE DES MATIÈRES

1. DESCRIPTION DU PROJET.....	7
1.1 INTRODUCTION.....	7
1.2 OBJECTIF GÉNÉRAL	8
1.3 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES.....	8
2. MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	9
2.1 MISE EN PLACE DE L'ESSAI.....	9
2.2 TRAITEMENTS	13
2.3 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET ANALYSES STATISTIQUES.....	13
2.4 COLLECTE DES DONNÉES ET ANALYSES.....	17
2.4.1 <i>Analyses physiques et chimiques de sol</i>	17
2.4.2 <i>Développement, nutrition et rendement de la pomme de terre</i>	19
2.4.3 <i>Suivi des pertes d'azote à l'environnement par le lessivage du nitrate</i>	20
2.4.4 <i>Calcul des coefficients d'utilisation et d'efficacité du N des engrais</i>	21
2.4.5 <i>Analyses économique</i>	21
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	23
3.1 BESOINS D'APPORTS EN EAU DURANT LA SAISON	23
3.2 DÉVELOPPEMENT ET NUTRITION DES PLANTS	23
3.3 DÉVELOPPEMENT DES TUBERCULES	25
3.4 AZOTE DISPONIBLE DU SOL.....	38
3.5 RENDEMENTS VENDABLES	40
3.6 EFFICACITE SAISONNIERE D'UTILISATION DU N DES ENGRAIS	42
3.7 PERTES D'AZOTE DANS L'ENVIRONNEMENT	46
3.7.1 <i>Azote minéral résiduel du sol</i>	46
3.7.2 <i>Nitrate lessivé</i>	49
3.8 ANALYSE ECONOMIQUE	51
4. CONCLUSION.....	54
5. BIBLIOGRAPHIE	55
REMERCIEMENTS.....	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques agronomiques du sol, printemps 2011.....	9
Tableau 2. Dates d'implantation et des principales opérations culturales au cours des deux années de l'étude.	10
Tableau 3. Dates des divers échantillonnages de sol et de végétaux.	17
Tableau 4. Nombre d'épisodes d'irrigation effectués par période en 2011 et 2012 dans les traitements irrigués.	23
Tableau 5. Poids en matière sèche des plants en cours de saison selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation en 2011 et 2012.	24
Tableau 6. Nutrition azotée des plants en cours de saison selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation en 2011 et 2012.	25
Tableau 7. Proportion du poids produit en juillet par les plants en comparaison du poids total produit au terme de la saison pour 2011 et 2012.	29
Tableau 8. Contenu en azote disponible du sol en cours de saison selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, été 2011.	39
Tableau 9. Contenu en azote disponible du sol en cours de saison selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, été 2012.	40
Tableau 10. CUA et le CE du N en cours de saison et final, selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, été 2011.	45
Tableau 11. CUA et le CE du N en cours de saison et final, selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, été 2012.	46
Tableau 12. Teneurs en nitrate et en N potentiellement minéralisable du sol à la récolte, selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, saison 2011.	48
Tableau 13. Teneurs en nitrate et en N potentiellement minéralisable du sol à la récolte, selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, saison 2012.	48
Tableau 14. Rentabilité des traitements lorsque ceux-ci sont tous comparés les uns aux autres pour les saisons 2011 et 2012.	53
Tableau 15. Rentabilité des traitements lorsque ceux-ci sont comparés entre eux selon qu'une entreprise possède ou non un système d'irrigation pour les saisons 2011 et 2012.	53

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Disposition des lysimètres au site d'étude en début de saison, été 2011.....	10
Figure 2. Aperçu de la disposition des gicleurs du système d'irrigation au centre des parcelles irriguées du dispositif expérimental.....	11
Figure 3. Précipitations journalières (mm) à Deschambault de la fin mai au début octobre 2011.....	12
Figure 4. Précipitations journalières (mm) à Deschambault de juin à la fin à octobre 2012.....	12
Figure 5. Dispositif expérimental au champ utilisé à Deschambault en 2011 et 2012.	14
Figure 6. Disposition des divers échantillonnages et équipements dans les parcelles d'essais en 2011.....	15
Figure 7. Disposition des divers échantillonnages et équipements dans les parcelles d'essais en 2012.....	16
Figure 8. Écart d'analyse entre les valeurs obtenues en laboratoire et celles obtenues au Nitracheck.....	18
Figure 9. Récolte hebdomadaire de l'eau des lysimètres, été 2011.....	20
Figure 10. Tubercules de poids différent photographiés sur papier quadrillé au 2,54 cm (1 po.).....	26
Figure 11. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids unitaire de ces derniers et le traitement au 28 juillet 2011.....	27
Figure 12. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids unitaire de ces derniers et le traitement au 28 septembre 2011.....	27
Figure 13. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids unitaire de ces derniers et le traitement au 16 juillet 2012.....	28
Figure 14. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids unitaire de ces derniers et le traitement au 25 septembre 2012.....	28
Figure 15. Suivi périodique du poids total moyen en tubercules par plant selon le traitement au 28 juillet 2011.....	30
Figure 16. Suivi périodique du poids total moyen en tubercules par plant selon le traitement au 28 septembre 2011.....	30
Figure 17. Suivi périodique du poids total moyen en tubercules par plant selon le traitement au 16 juillet 2012.....	31
Figure 18. Suivi périodique du poids total moyen en tubercules par plant selon le traitement au 25 septembre 2012.....	31
Figure 19. Corrélation entre le poids moyen en matière sèche d'un plant de chacune des 30 parcelles et le nombre moyen en tubercules produits par ces plants ayant un poids compris entre 50 et 100 g au 28 juillet 2011.....	32
Figure 20. Corrélation entre le poids moyen en matière sèche d'un plant de chacune des 30 parcelles et le nombre moyen en tubercules produits par ces plants ayant un poids compris entre 100 et 150 g au 28 juillet 2011.....	33
Figure 21. Corrélation entre le poids moyen en matière sèche d'un plant de chacune des 30 parcelles et le nombre moyen en tubercules produits par ces plants ayant un poids compris entre 50 et 100 g au 16 juillet 2012.....	33

Figure 22. Corrélation entre le poids moyen en matière sèche d'un plant de chacune des 30 parcelles et le nombre moyen en tubercules produits par ces plants ayant un poids compris entre 100 et 150 g au 16 juillet 2012.	34
Figure 23. Corrélation entre la masse sèche individuelle des plants des 10 traitements en juillet et le poids moyen en tubercules produits au final par ces plants en 2011.	35
Figure 24. Corrélation entre la masse sèche individuelle des plants des 10 traitements en juillet et le poids moyen en tubercules produits au final par ces plants en 2012.	35
Figure 25. Corrélation entre la masse sèche individuelle des plants des traitements fertilisés en N en juillet et le taux d'utilisation du N des engrais au même stade 2011.	36
Figure 26. Corrélation entre la masse sèche individuelle des plants des traitements fertilisés en N en juillet et le taux d'utilisation du N des engrais au même stade 2012.	36
Figure 27. Corrélation entre le poids moyen en matière sèche d'un plant pour chacun des traitements fertilisés en N et le taux d'utilisation final du N des engrais à la récolte en 2011.	37
Figure 28. Corrélation entre le poids moyen en matière sèche d'un plant pour chacun des traitements fertilisés en N et le taux d'utilisation final du N des engrais à la récolte en 2012.	37
Figure 29. Rendements vendables en tubercules à la récolte selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, saison 2011.	41
Figure 30. Rendements vendables en tubercules à la récolte selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, saison 2012.	42
Figure 31. Évolution de la concentration des N-NO ₃ dans l'eau de lessivage en cours de saison selon les régies de fertilisation, tous traitements d'irrigation confondus, été 2011.	50
Figure 32. Évolution de la concentration des N-NO ₃ dans l'eau de lessivage en cours de saison selon les régies de fertilisation et d'irrigation, été 2012.	51

1. DESCRIPTION DU PROJET

1.1 Introduction

La pomme de terre est une culture importante au Québec avec 17 000 hectares en production en 2012 (ISQ, 2013). Cette plante au système racinaire peu développé se cultive généralement en sols légers et drainants. L'azote (N) est le principal facteur de rendement de la pomme de terre et si l'on considère une application moyenne de 175 kg N ha⁻¹ sur ces 17 000 hectares, environ 3,0 millions de kilogrammes de N sont appliqués annuellement au Québec. L'azote est un élément qui ne se fixe pas aux particules de sol et qui est très facilement emporté par l'eau, surtout en sols sableux. De plus, son taux d'utilisation par le plant est faible, < 60 %, et pouvant s'abaisser dans les 30 % en cas d'excès d'eau de pluie ou d'irrigation. D'importantes conséquences économiques pour les producteurs en découlent. Le lessivage de nitrate est d'ailleurs le principal mécanisme par lequel se perd le N en production de pommes de terre, avec des quantités allant de 10 à 200 kg N-NO₃ ha⁻¹ (Giroux, 2003). Ces pertes affectent la qualité de l'eau souterraine. Au Québec, entre 1999-2001, l'eau de 42 % des puits situés dans les régions productrices de pommes de terre excédait la norme pour l'eau potable (Giroux, 2003). La Fédération des producteurs de pommes de terre du Québec (FPPTQ) considère d'ailleurs comme prioritaire la diminution de la pollution diffuse du N par une meilleure connaissance du potentiel agronomique des pratiques culturales. La quantification des gains économiques et environnementaux pouvant découler de l'utilisation des engrais à libération contrôlée (ELC) s'inscrit dans cette lignée. En fait, devant leur disponibilité croissante sur le marché, les producteurs québécois ont tout intérêt à savoir si, sous nos conditions, l'utilisation d'un ELC constitue une innovation intéressante du point de vue économique et agronomique. Et le test doit être fait, car pour une majorité de ELC, le principe de libération repose sur l'atteinte d'une température minimale du sol et/ou de son taux d'humidité. Les printemps plus froids, la saison de croissance plus courte et le climat humide du Québec, comparativement à plusieurs endroits où l'utilisation des ELC est fréquente, auront donc à coup sûr un impact sur les bénéfices pouvant en être tirés. Malgré cela, certaines caractéristiques des ELC suggèrent que des gains sont possibles. D'une part, le N encapsulé est protégé de la dissolution massive découlant d'événements pluvieux intenses, de moins en moins exceptionnels au Québec. De plus, la libération progressive du N tout au long de la saison diminue les quantités de nitrate pouvant être lessivées ponctuellement lors d'un excès d'eau de précipitations. Il se pourrait donc que des doses moindres de N puissent être utilisées. Les bénéfices pourraient être encore plus grands en cultures irriguées. La pratique croissante de l'irrigation et la hausse constante du prix des engrais N, qui suit le cours du pétrole, renforcent la pertinence de cet essai.

1.2 Objectif général

Permettre une amélioration du gain pouvant être tiré de la fertilisation azotée dans la pomme de terre en favorisant un taux supérieur d'utilisation du N des engrais par la valorisation des engrais à libération contrôlée (ELC), peu sensibles au lessivage, diminuant du même coup les risques de pollution diffuse par le N.

1.3 Objectifs spécifiques

- Vérifier l'impact de l'utilisation d'un engrais à libération contrôlée sur :
 - 1- La fertilité des sols et la nutrition des plants;
 - 2- Le développement des plants en saison et le rendement final en pommes de terre;
 - 3- Le taux d'utilisation du N des engrais en cours de saison et au total, incluant les exportations;
 - 4- Le lessivage de nitrate et le nitrate résiduel post-récolte.
- Vérifier si les gains potentiels résultant de l'utilisation des ELC sont augmentés dans le cas où les cultures sont irriguées.
- Calculer les coûts des diverses régies comparées en lien avec les revenus obtenus.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 Mise en place de l'essai

Ce projet s'est échelonné sur deux ans à la Station de recherche de Deschambault, du printemps 2011 à l'automne 2012, dans un sol de type loam sableux (84 % sable, 12 % limon et 4 % argile) dont les caractéristiques sont présentées au Tableau 1. Le cultivar à l'étude était le *Goldrush*, en raison de son expansion dans la culture de la pomme de terre au Québec et du peu d'études réalisées avec ce dernier. Les dates de plantation, d'apports en fertilisants et de récolte sont résumées au Tableau 2. Les plantons ont été plantés à 0,33 m d'espacement sur le rang, pour une densité théorique de 32 584 plants ha⁻¹ avec des tubercules entiers certifiés Élite-4 de calibre 1-1/2 à 6 oz. L'espacement entre les rangs était de 0,93 m.

Tableau 1. Caractéristiques agronomiques du sol, printemps 2011.

Paramètres	Valeurs
pH _{eau}	6,34
Matière organique (MO) (%)	0,91
N _{tot} (%)	0,049
N-NO ₃ (mg kg ⁻¹ b.s.)	2,98
N-NH ₄ (mg kg ⁻¹ b.s.)	1,11
Éléments Mehlich-3 (kg ha ⁻¹ b.s.)	
P	556
K	232
Ca	1395
Mg	61
Al (mg kg ⁻¹)	905
P/Al (%)	27,4

Préalablement à la plantation, des sillons ont été tracés mécaniquement. Les différents mélanges d'engrais, préparés au mélangeur rotatif, ont été appliqués à la main et répartis uniformément dans les sillons. La totalité des engrais phosphatés (0-46-0) et potassiques (0-0-22-11 et 0-0-60) a été apportée à cette étape. Par contre, l'engrais azoté (27-0-0 et FRN 44-0-0) a été fractionné, tel que recommandé par les grilles de fertilisation de la pomme de terre (CRAAQ, 2010a), en deux doses (Tableau 2). Les bandes d'engrais ont été recouvertes d'une mince couche de sol, au râteau, afin d'éviter le contact direct avec les plantons, lesquels ont ensuite été plantés manuellement puis enterrés par un léger buttage manuel du sol. Au fractionnement, l'azote a aussi été apporté en bande, à la main, en quantités égales de chaque côté des plants. Les doses de fertilisants apportées ont été fixées selon les recommandations du Guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ, 2010a). Ainsi, toutes les parcelles ont reçu 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅ et 160 kg ha⁻¹ de K₂O. La dose d'azote du traitement référence a été fixée à 150 kg N ha⁻¹. Outre la fertilisation, la régie de production était similaire à celle utilisée par les producteurs de pommes de terre du

Québec et la régie de protection a été faite selon les recommandations du CRAAQ et du Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP). Le défanage des plants s'est fait naturellement en 2011, sans ajout de défanant chimique et par application de Réglone (3,5 L ha⁻¹) en 2012.

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

Opérations	Dates	
	2011	2012
Plantation	31 mai	15 mai
Application des engrais au printemps (N, P, K)	31 mai	15 mai
Sarclage	20 juin	6 juin
Fractionnement du N et renchaussage	8 juillet	28 juin
Défanage	1 septembre	13 août
Récolte	3 octobre	25 septembre

Suite à l'implantation, chacune des parcelles a été équipée d'un lysimètre à suction d'une longueur de 0,93 m (modèle 1900L36-BO2M2 d'Hoskin Scientific) (Figure 1). L'installation des lysimètres s'est effectuée rapidement après la plantation afin d'éviter tout risque de précipitations entre l'application des engrais et l'installation des lysimètres. Ces derniers ont été placés de sorte à ce que la bougie poreuse soit située en deçà de la zone de sol exploitée par les racines des plants de pommes de terre, soit à une profondeur de 0,65 m, permettant ainsi le captage de l'eau lessivée et du nitrate (N-NO₃) qu'elle contient.



Figure 1. Disposition des lysimètres au site d'étude en début de saison, été 2011.

Le système d'irrigation par aspersion a ensuite été mis en place (Figure 2). Un gicleur a été installé dans chacune des parcelles devant recevoir de l'irrigation en cours de projet afin de pouvoir les irriguer individuellement. Les gicleurs étaient reliés de façon individuelle à une valve et possédaient tous un régulateur de pression de 1,72 bar (25 PSI)

permettant de maintenir le débit (22 litres par minute ou 5,8 gallons É-U par minute) uniforme lorsque plusieurs gicleurs fonctionnaient simultanément. Toutes les parcelles, même celles ne recevant pas d'irrigation, étaient également équipées d'un tensiomètre (modèle Tx-80 d'HORTAU) afin de connaître l'état hydrique du sol. Ces derniers étaient également utilisés pour gérer les apports en eau en fonction des besoins de chacune des parcelles devant être irriguées. L'irrigation était déclenchée lorsque la réserve en eau utile du sol avait diminué de 50 %. En effet, des essais réalisés au Québec ont démontré qu'un surplus d'eau affecte négativement le rendement (Boivin et Landry, 2008; Boivin, Landry et Caron, 2008). En ce sens, le déclenchement de l'irrigation lorsque 50 % de la réserve en eau utile du sol est épuisée a été démontré comme optimal d'un point de vue environnemental et économique pour ce type de sol (Boivin et Landry, 2011). Des tensiomètres supplémentaires (modèles T-80 et Tx-80 d'HORTAU) ont aussi été installés à une profondeur de 30 et 60 cm dans certaines parcelles afin de valider la durée des épisodes d'irrigation et la direction du mouvement de l'eau dans le sol. Toutes les données obtenues des tensiomètres Hortau T-80 et Tx-80 étaient enregistrées en continu dans un ordinateur à l'aide du logiciel Irrolis-Light (version 1.9) de Hortau. De plus, une station météo complète a été implantée 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 acquiiseur de données intégré, les différents appareils de mesure étaient reliés à un CR1000 (acquiiseur de données de Campbell Scientific). Les précipitations des deux années d'étude sont résumées aux Figure 3 et Figure 4).



Figure 2. Aperçu de la disposition des gicleurs du système d'irrigation au centre des parcelles irriguées du dispositif expérimental.

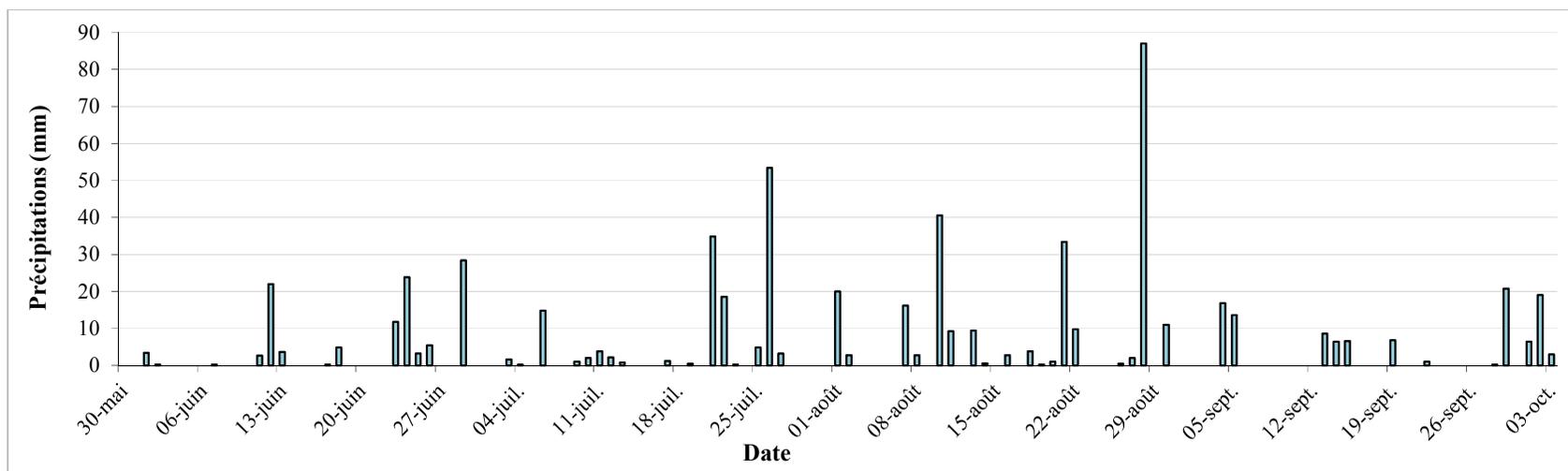


Figure 3. Précipitations journalières (mm) à Deschambault de la fin mai au début octobre 2011.

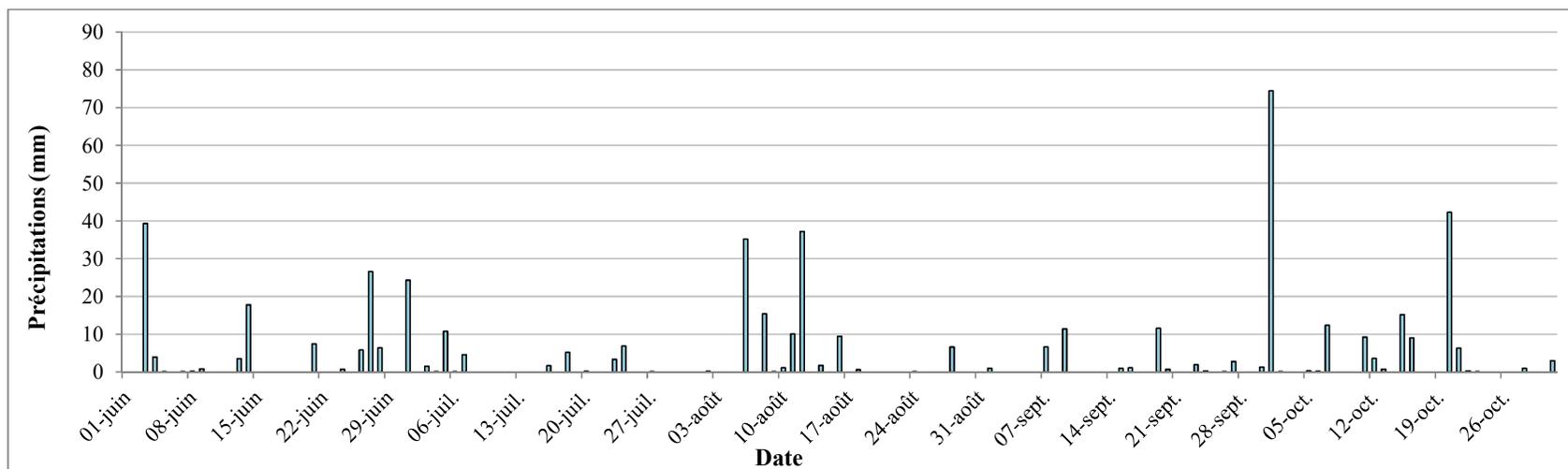


Figure 4. Précipitations journalières (mm) à Deschambault de juin à la fin à octobre 2012.

2.2 Traitements

Ce projet comprenait dix traitements qui variaient en fonction du type d'engrais azoté utilisé, du mode de fractionnement et de l'irrigation. Les engrais comparés étaient l'engrais conventionnel nitrate d'ammonium calcique 27-0-0 (ECV) et l'engrais à libération contrôlée (urée enrobée) FRN 44-0-0 (ELC) commercialisé par 'Agrium Advanced Technologies'. De plus, deux témoins non fertilisés, irrigué et non irrigué, permettant de connaître la fourniture en azote du sol, ont été inclus. La liste suivante détaille les divers traitements:

Irrigués

- 1- 50 kg ha⁻¹ ECV à la plantation + 100 kg ha⁻¹ ECV au fractionnement (**ECV50+ECV100**) - **I**
- 2- 50 kg ha⁻¹ ECV à la plantation + 100 kg ha⁻¹ ELC au fractionnement (**ECV50+ELC100**) - **I**
- 3- 50 kg ha⁻¹ ECV à la plantation + 70 kg ha⁻¹ ELC au fractionnement (**ECV50+ELC70**) - **I**
- 4- 150 kg ha⁻¹ ELC d'engrais à la plantation (**ELC150**) - **I**
- 5- Témoin non fertilisé en N (**TN0-I**)

Non-irrigués

- 6- 50 kg ha⁻¹ ECV à la plantation + 100 kg ha⁻¹ ECV au fractionnement (**ECV50+ECV100**) - **I₀**
- 7- 50 kg ha⁻¹ ECV à la plantation + 100 kg ha⁻¹ ELC au fractionnement (**ECV50+ELC100**) - **I₀**
- 8- 50 kg ha⁻¹ ECV à la plantation + 70 kg ha⁻¹ ELC au fractionnement (**ECV50+ELC70**) - **I₀**
- 9- 150 kg ha⁻¹ ELC d'engrais à la plantation (**ELC150**) - **I₀**
- 10- Témoin non fertilisé en N (**TN0-I₀**)

2.3 Dispositif expérimental et analyses statistiques

Les 10 traitements, répétés 3 fois (blocs), étaient assignés selon un dispositif en tiroirs subdivisés (split-plot) comprenant les traitements d'irrigation en parcelles principales et les traitements d'engrais N en sous-parcelles, pour un total de 30 parcelles (Figure 5). Les parcelles avaient 8 rangs de 7,44 m de long, espacés de 0,93 m. Au cours des deux années, le 1^{er} et le 8^e rang ont servi de rangs de garde. De plus, afin de minimiser la compaction du sol, les échantillonnages ont été répartis selon les rangs, en prenant soin de conserver deux rangs uniquement pour l'évaluation du rendement final (Figure 6 et Figure 7). Ainsi, en 2011, l'échantillonnage de plants et la récolte périodique de tubercules en saison ont été faits sur le 2^e et le 7^e rang. Les rangs 3 et 6 agissaient comme rangs de garde pour ceux utilisés pour le rendement. Les lysimètres étaient installés sur le 7^e rang et les tensiomètres sur le 2^e rang. Le dispositif d'irrigation était situé au centre des rangs 4 et 5. La récolte périodique finale a été effectuée sur 4 plants consécutifs du 4^e rang, lesquels ont ensuite été réintégrés à l'ensemble des plants prélevés pour la récolte finale, celle-ci mesurée sur 4 m au centre des rangs 4 et 5. En 2012, des changements ont été apportés afin de minimiser encore davantage l'impact de la compaction sur les rendements lors de la pose du système d'irrigation qui doit, de plus, être retiré puis remis pour permettre le passage de la machinerie lors du sarclage et du renchaussage (Figure 7). De même, des rangs distincts ont été utilisés pour les tensiomètres et les lysimètres. Ainsi, l'échantillonnage de plants pour les prélèvements de masse sèche a été fait sur le 5^e, 6^e et le 7^e rang. La récolte périodique de tubercules en saison a été effectuée dans le 7^e rang. Les lysimètres et les tensiomètres ont été installés sur le 7^e et 6^e rang, respectivement. Le dispositif d'irrigation était situé au centre du 4^e et 5^e rang. La

récolte périodique finale a été effectuée sur 4 plants consécutifs du 3^e rang, lesquels ont ensuite été réintégrés à l'ensemble des plants prélevés pour la récolte finale, celle-ci mesurée sur 4 m au centre des rangs 2 et 3.



Figure 5. Dispositif expérimental au champ utilisé à Deschambault en 2011 et 2012.

		7,44 mètres							
7,44 mètres	22	G	G	G	G	G	G	G	G
	21	G	G	G	G	G	G	G	G
	20	G	G	G	G	G	G	G	G
	19	G	G	G	G	G	G	G	G
	18	G	R1+P2	G	G	G	G	P1	G
	17	G	R1+P2	G	RF+R2	RF	G	P1	G
	16	G	R1+P2	G	RF+R2	RF	G	P1	G
	15	G	R1+P2	G	RF+R2	RF	G	P1	G
	14	G	G	G	RF+R2	RF	G	G	G
	13	G	G	G	RF	RF	G	G	G
	12	G	G	G	RF	RF	G	G	G
	11	G	T	G	G	RF	S	RF	G
	10	G	G	G	G	RF	RF	G	G
	9	G	G	G	G	RF	RF	G	G
	8	G	G	G	G	RF	RF	G	G
	7	G	P3	G	G	RF	RF	L	G
	6	G	P3	G	G	RF	RF	G	G
	5	G	P3	G	G	G	G	G	G
	4	G	P3	G	G	G	G	G	G
	3	G	G	G	G	G	G	G	G
	2	G	G	G	G	G	G	G	G
	1	G	G	G	G	G	G	G	G
		1	2	3	4	5	6	7	8
	Plants de garde		G		Échantillonnage de plants		Gicleur	S	
	Récoltes périodiques (tubercules)		R1 - R2		Pré-fractionnement	P1	Tensiomètre	T	
	Récolte finale (tubercules)		RF		Début août	P2	Lysimètre	L	
					Pré-défanage	P3			

Figure 6. Disposition des divers échantillonnages et équipements dans les parcelles d'essais en 2011.

		7,44 mètres							
7,44 mètres	22	G	G	G	G	G	G	G	G
	21	G	G	G	G	G	G	G	G
	20	G	G	G	G	G	G	G	G
	19	G	G	G	G	G	G	G	G
	18	G	G	G	G	P1	G	R1+P2	G
	17	G	RF+R2	RF	G	P1	G	R1+P2	G
	16	G	RF+R2	RF	G	P1	G	R1+P2	G
	15	G	RF+R2	RF	G	P1	G	R1+P2	G
	14	G	RF+R2	RF	G	G	G	G	G
	13	G	RF	RF	G	G	G	G	G
	12	G	RF	RF	G	G	T	G	G
	11	G	RF	RF	G	S	G	G	G
	10	G	RF	RF	G	G	G	L	G
	9	G	RF	RF	G	G	G	G	G
	8	G	RF	RF	G	G	G	G	G
	7	G	RF	RF	G	G	P3	G	G
	6	G	RF	RF	G	G	P3	G	G
5	G	G	G	G	G	P3	G	G	
4	G	G	G	G	G	P3	G	G	
3	G	G	G	G	G	G	G	G	
2	G	G	G	G	G	G	G	G	
1	G	G	G	G	G	G	G	G	
		1	2	3	4	5	6	7	8
	Plants de garde		G		Échantillonnage de plants		Gicleur	S	
	Récoltes périodiques (tubercules)		R1 - R2		Pré-fractionnement	P1	Tensiomètre	T	
	Récolte finale (tubercules)		RF		Début août	P2	Lysimètre	L	
					Pré-défanage	P3			

Figure 7. Disposition des divers échantillonnages et équipements dans les parcelles d'essais en 2012.

Une analyse de la variance a été réalisée pour chacune des variables à l'étude afin d'étudier les effets des traitements de fertilisation et d'irrigation sur ces variables. Un modèle mixte normal a été ajusté avec la procédure PROC MIXED de SAS (Littell et Coll., 2006). Les effets fixes étaient le mode d'irrigation (avec ou sans irrigation), le type d'engrais (5 différents types) et l'interaction Irrigation×Fertilisant. Les effets aléatoires étaient les blocs et l'interaction bloc×Irrigation. Lorsque les observations d'une variable ont été réalisées sur plusieurs périodes, l'analyse a été faite séparément pour chaque période, sauf pour les données recueillies sur les lysimètres. Pour les variables des lysimètres seulement, les effets fixes de la date et des interactions doubles et triples impliquant la date,

ont été ajoutés au modèle. Les effets aléatoires associés aux mesures répétées sur chacune des parcelles à des dates différentes ont aussi été modélisés avec une matrice de variance-covariance pour tenir compte des corrélations entre ces mesures. Les degrés de liberté ont été calculés avec l'approximation de Satterthwaite. Dans tous les cas, une analyse graphique des résidus a servi à vérifier les hypothèses sous-jacentes à la validité du modèle. Dans quelques cas seulement, une transformation racine carrée sur les valeurs observées a été appliquée pour homogénéiser la variance des résidus. Lorsque l'effet d'un facteur était déclaré significatif par le test de F, les tests de t des différences deux-à-deux entre les niveaux de ces facteurs ont été effectués.

2.4 Collecte des données et analyses

Tout au long du projet, divers échantillonnages de sol et de végétaux ont été effectués. La répartition de ces activités dans le temps, dont la méthodologie est décrite dans les sections subséquentes, est résumée au Tableau 3.

Tableau 3. Dates des divers échantillonnages de sol et de végétaux.

		Dates						
Stades :		Avant	50-75%	Défanage	Récolte			
		fractionnement	floraison					
2011 :	20 mai	2 juin	7 juil.	27 juil.	1 sept.	28 sept.	3 oct.	1 nov.
2012 :	-	15 mai	22 juin	16 juil.	13 août	24 sept.	25 sept.	16 oct.

Activités [†]	Carac.							
			N _{min}	N _{min}			N _{min}	C _{tot} et N _{tot}
	Salinité			Salinité				
			Feuille	Feuille				Incubation
			Plant	Plant	Plant			
				Tubercule		Tubercule		
	Lysi						Récolte	Lysi

[†] Carac., caractérisation du sol; N_{min}, dosage du NH₄ et NO₃ du sol; N_{tot}, dosage du N total du sol; C_{tot}, dosage du C total du sol; Incubation, potentiel de minéralisation du N organique du sol; Feuille, dosage du N_{tot} dans la feuille; Plant, masse sèche et dosage du N_{tot}; Tubercule, masse sèche et dosage du N_{tot} des récoltes périodiques; Récolte, récolte finale avec masse sèche et dosage du N_{tot}; Lysi, début et fin du suivi du N_{min} aux lysimètres.

2.4.1 Analyses physiques et chimiques de sol

Les analyses de sol ont toutes été réalisées sur des échantillons composites de dix sous-échantillons, sauf celle de la masse volumique apparente (MVA) qui a été établie en triplicata. Lors de l'établissement du site, en 2011, les échantillons servant à la caractérisation du sol de la planche d'essai ont été prélevés dans la strate de sol 0-20 cm afin de déterminer le pH_{eau}, les éléments majeurs Mehlich-3 et d'évaluer le % de C et N du sol. Un échantillonnage a également été effectué dans la strate 0-30 cm afin de déterminer la granulométrie du sol, la teneur en MO ainsi que les teneurs initiales en N-NO₃ et N-NH₄. Des échantillons de sol non perturbé ont aussi été prélevés dans chacun des blocs afin

d'établir en laboratoire les courbes de désorption en eau des sols (Topp et Coll., 1993). Par la suite, les deux années, tous les échantillons de sol ont été pris dans la strate 0-30 cm, simultanément avec la MVA, et prélevée dans les strates 0-15 et 15-30 cm. 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 à la mesure du potentiel de minéralisation du N organique (N_o) qui étaient tamisés frais à 4 mm. Les valeurs obtenues ont été rapportées en $kg\ ha^{-1}$ sur base sèche (b.s.) en utilisant la MVA mesurée simultanément par l'insertion de cylindre de cuivre au sol. Le sol des cylindres a ensuite été séché à 105 °C afin d'en retirer l'eau puis pesé. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points suivi d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des productions végétales du Québec, 1988). Les contenus en carbone (C) et azote (N) totaux ont été mesurés par combustion au Leco. Le N minéral (N_{min}) sous forme de nitrate ($N-NO_3$) et d'ammonium ($N-NH_4$) a été extrait au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminé par colorimétrie au Technicon AA-II. Une analyse au Nitratecheck était aussi prévue, mais a dû être annulée. En effet, les contrôles en laboratoire ont révélé un important biais, variable en fonction de la concentration en nitrate dans l'extrait, entre les valeurs réelles mesurées en laboratoire et celles dosées avec les bandelettes (Figure 8). Puisqu'aucun autre lot de bandelettes n'a été mis en vente par la compagnie au cours des années de l'essai, cette analyse n'a pu être réalisée. Le phosphore (P), le potassium (K) et les éléments mineurs ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et Simard, 1993) et dosés à l'ICP optique. La salinité a été mesurée dans un rapport sol/eau 1:1 (Whitney, 2011). Enfin, les sols ont été incubés à 25°C pendant 20 et 10 jours en 2011 et 2012, respectivement (Fox et Piekielek, 1978; Juma et Paul, 1984). Les contenus en N_{min} ($N-NO_3$ et $N-NH_4$) au temps zéro et à la fin de l'incubation (2011, 20 jours; 2012, 10 jours) ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et dosés par colorimétrie au Technicon AA-II.

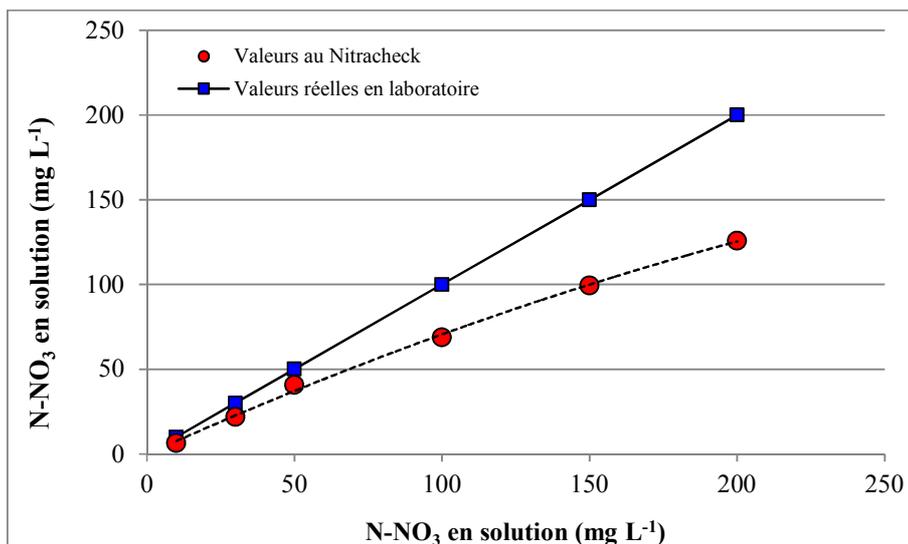


Figure 8. Écart d'analyse entre les valeurs obtenues en laboratoire et celles obtenues au Nitratecheck.

2.4.2. Développement, nutrition et rendement de la pomme de terre

L'analyse du N_{tot} de la 4^e feuille mature, reconnue comme un indicateur nutritionnel fiable dans la culture de la pomme de terre, a été réalisée à deux reprises en cours de saison (Tableau 3). Dans chacune des parcelles, dix feuilles ont été prélevées en avant-midi, car il est reconnu que le contenu en nitrate des plantes est très affecté par la quantité de lumière. Les échantillons ont été conservés dans une glacière à 4 °C jusqu'à leur réception au laboratoire. Les folioles ont alors été séchées à 65 °C et broyées à 100 mesh. Le N_{tot} a ensuite été extrait selon la méthode Kjeldahl (Isaac et Johnson, 1976) et dosé par colorimétrie automatisée sur autoanalyseur Technicon AA-II.

À trois reprises durant la saison (Tableau 3), quatre plants (fanés) par parcelles ont aussi été prélevés pour suivre l'évolution de la masse sèche (MS) et des prélèvements en N de la biomasse aérienne. Pour se faire, la teneur en N_{tot} des plants a été déterminée à chacune des dates d'échantillonnage tel que décrit pour les folioles. Les prélèvements de N_{tot} de la biomasse aérienne ont ensuite été calculés comme suit :

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

De plus, à deux moments durant la saison (Tableau 3), des récoltes périodiques de tubercules ont été effectuées. Le but de ces récoltes n'est pas de déterminer un rendement à l'hectare, mais de mieux caractériser le développement des tubercules. Ces récoltes permettent aussi d'avoir un portrait plus global des prélèvements en N à ces stades de production en permettant d'additionner les prélèvements des fanés à ceux des tubercules. Ainsi, lors de ces récoltes, la production totale en tubercules de quatre plants consécutifs a été mesurée et les tubercules classés selon leur poids unitaire. Un échantillon composite de tubercules sains, non pelés et nettoyés, a ensuite été prélevé, découpé en bâtons, mis à sécher à 65 °C et broyés à 100 mesh. Le N_{tot} a ensuite été extrait et dosé tel que décrit pour les folioles. Les prélèvements en N_{tot} ont ensuite été calculés comme suit :

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

$$\text{PVL } N_{\text{tot}} \text{ global} = \text{PVL } N_{\text{tot}} \text{ Plant} + \text{PVL } N_{\text{tot}} \text{ tubercule}$$

En fin de saison, une récolte sur une surface beaucoup plus importante, soit 8 m linéaires (4 m linéaires sur deux rangs), a aussi été effectuée afin d'établir les rendements totaux et vendables à l'hectare. Les tubercules ont été classés par calibre selon les normes de l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) pour les pommes de terre de type long (Canada #1 : diam > 51 mm et < 89 mm, Canada #1 grosses : diam > 89 mm et < 114 mm) (ACIA, 2013). Par la suite 25 tubercules ont été prélevés de façon aléatoire dans chacun des lots récoltés. Chacun des tubercules a été évalué pour déterminer un indice pour la rhizoctonie, tenant compte à la fois de la sévérité des symptômes de cette maladie et du pourcentage de recouvrement de ceux-ci sur les tubercules. D'autre part, le poids spécifique a été mesuré à partir d'un sous-échantillon de 3 kg de tubercules par parcelle. Le sous

échantillon a d'abord été pesé (poids dans l'air). Les tubercules ont ensuite été plongés dans l'eau et le poids noté à nouveau (poids dans l'eau). Le poids spécifique est le résultat de la division du poids dans l'air par la différence entre le poids dans l'air et celui dans l'eau. Par ailleurs, un échantillon composite de cinq tubercules sains, non pelés et nettoyés, a été prélevé dans chacune des parcelles, puis préparé et analysé pour la teneur en N_{tot} tel que décrit pour les récoltes périodiques. Cette information a servi au calcul des exportations en N_{tot} de la culture. Elle a aussi permis d'établir le prélèvement total en N pour la saison:

$$EXP N_{tot} = MS \text{ du rendement total en tubercules} * \text{concentration en } N_{tot} \text{ des tubercules}$$

$$PVL N_{tot} \text{ total} = N_{tot} \text{ exporté} + N_{tot} \text{ des plants avant défanage}$$

2.4.3. Suivi des pertes d'azote à l'environnement par le lessivage du nitrate

L'échantillonnage des eaux de lessivage s'est fait tout au long de la saison, une fois par semaine, durant 22 semaines, les 2 années (Tableau 3 et Figure 9). Lors de chacun des échantillonnages, les lysimètres étaient remis sous tension (80 kPa) manuellement. De plus, dans les premières semaines suivant l'installation des lysimètres au champ, un suivi bi-hebdomadaire a été effectué afin de s'assurer qu'ils conservaient adéquatement leur tension. Ce suivi a par la suite été abrogé pour éviter la compaction près des lysimètres. Les échantillons d'eau récoltés étaient conservés dans une glacière à 4 °C jusqu'à leur réception au laboratoire, où ils étaient congelés jusqu'à leur analyse. Le $N-NO_3$ et le $N-NH_4$ contenus dans les échantillons ont été dosés par colorimétrie automatisée à flot continu (FIA) après filtration de l'eau à 0,45 micron.



Figure 9. Récolte hebdomadaire de l'eau des lysimètres, été 2011.

2.4.4. Calcul des coefficients d'utilisation et d'efficacité du N des engrais

Une fois les PVL totaux connus, le coefficient d'utilisation apparente (CUA) du N peut être calculé pour chacun des traitements. Le CUA s'établit en comparant la quantité de N fourni par les engrais en comparaison de ce que le sol seul fournit. Pour obtenir le coefficient d'efficacité (CE) des diverses régies à l'essai, le CUA du N obtenu pour chacune des régies est ensuite comparé à celui obtenu avec la régie usuelle (ECV50+ECV100 non irriguée), testée en même temps, dont l'efficacité est la mesure étalon. En effet, bien que le CUA du N des engrais minéraux ne soit jamais de 100 %, le taux d'utilisation qu'ils atteignent est considéré comme étant le plus haut taux possible. Leur efficacité fertilisante est donc par défaut considérée égale à 100 %. Le CUA et le CE sont donc calculés selon l'équation suivante (Giroux et Coll., 2007) :

$$(1) \text{ CUA N étalon (\%)} = \frac{\text{PVL total N (ECV50+ECV100)}I_0 - \text{PVL total N du témoin } N_0-I_0}{\text{Dose apportée de N en engrais (ECV50+ECV100)}I_0}$$

$$(2) \text{ CUA N testés (\%)} = \frac{\text{PVL total N du traitement testé} - \text{PVL total N du témoin } N_0-I_0}{\text{Dose apportée de N en engrais du traitement testé}}$$

$$(3) \text{ CE (\%)} = \frac{\text{CUA du traitement testé}}{\text{CUA étalon}}$$

2.4.5 Analyse économique

L'analyse économique de ce projet compare la rentabilité des différents traitements d'irrigation et de fertilisation dans la pomme de terre. Puisqu'aucun autre facteur de production que la fertilisation et l'irrigation ne faisait l'objet d'essais, l'approche de la budgétisation partielle (BP) a été privilégiée. La BP tient compte des changements prévus aux modes de production qui ne touchent que certaines ressources bien spécifiques, lesquelles peuvent être changées sans modifier les opérations principales de l'entreprise (Castle et Coll., 1987). Dans ce projet, tous les comparatifs de la BP sont relatifs au traitement témoin sans fertilisation ni irrigation (N_0-I_0). Par conséquent, le résultat final de chaque traitement doit être vu comme l'effet sur la marge bénéficiaire et non sur la marge bénéficiaire en soi. Dans ce contexte, l'amélioration de la rentabilité a été estimée en calculant les revenus en plus associés à la vente de pommes de terre récoltées en plus, comparativement au traitement témoin. Aucun coût en moins n'a été considéré au chapitre de l'amélioration de la rentabilité. La détérioration de la rentabilité, quant à elle, a été mesurée en évaluant les coûts en plus associés aux différentes stratégies de fertilisation et d'irrigation. Aucun revenu en moins n'a été pris en compte. Pour chaque élément de l'amélioration et de la détérioration de la rentabilité, certaines hypothèses ont été posées et celles-ci sont expliquées dans les lignes suivantes.

a) Revenus en plus :

Les revenus en plus ont été calculés par la formule suivante :

$$P \times (RV_i - RV_t)$$

Où : P = la moyenne arithmétique des prix hebdomadaires des années 2009/2010 à 2011/2012 pour la pomme de terre blanche livrée au grossiste-distributeur (vrac livré au poste d'emballage);

RV_i = le rendement vendable du traitement i ;

RV_t = le rendement vendable du témoin sans fertilisation ni irrigation.

b) Coûts en plus :

i. Coût d'irrigation

Le coût d'irrigation utilisé provient des Références économiques du Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec pour la production de pomme de terre (CRAAQ, 2010b) et s'établit à 143 \$ irrigation⁻¹ ha⁻¹. Ce coût est établi pour un système mobile d'irrigation par aspersion dont le coût d'acquisition se chiffre à plus de 65 000 \$. Dans ce système, deux irrigations sont prévues pendant la saison de production. Le système d'irrigation utilisé par le producteur peut évidemment varier, et incidemment les coûts de l'irrigation (MAAARO, 2004). C'est pourquoi, une analyse de sensibilité a été réalisée pour des coûts d'irrigation variant de 100 \$ à 200 \$ irrigation⁻¹ ha⁻¹ afin de pouvoir transposer l'analyse au contexte de différents coûts d'irrigation.

ii. Coût de fertilisation

Les coûts considérés pour la fertilisation sont liés au prix des fertilisants et aux frais des opérations culturales. Les prix de fertilisants retenus sont ceux payés dans le cadre du projet, soit 720 \$ t⁻¹ pour le nitrate calcique (27-0-0) et 1 000 \$ t⁻¹ pour l'engrais à libération contrôlée (ELC). Ces prix, rapportés au kilogramme d'azote, sont respectivement de 2,67 \$ et 2,27 \$ kg⁻¹ N. Le coût lié au fractionnement de l'azoté est tiré du CRAAQ (2012a) et se situe à 5,30 \$ ha⁻¹.

L'analyse de sensibilité prévoit l'utilisation de différents coûts de fertilisants dans le calcul de l'effet sur la marge bénéficiaire. Ainsi, les résultats du scénario de base ont été soumis aux variations de prix des fertilisants sur la base des prix publiés par le CRAAQ (2012b). Pour le nitrate calcique, le prix moyen est la moyenne des prix de 2010 à 2012, soit 580 \$ t⁻¹ (2,16 \$ kg⁻¹ N). Pour l'ELC, le prix moyen utilisé est celui de l'urée pour la même période, soit 690 \$ t⁻¹ (1,56 \$ kg⁻¹ N). Pour les scénarios de prix minima, ils ont été de 520 \$ t⁻¹ (1,93 \$ kg⁻¹ N) pour le 27-0-0 et 608 \$ t⁻¹ (1,38 \$ kg⁻¹ N) pour l'ELC. Enfin, les prix maxima pour la période 2010-2012 ont été de 651 \$ t⁻¹ (2,41 \$ kg⁻¹ N) pour le 27-0-0 et 811 \$ t⁻¹ (1,84 \$ kg⁻¹ N) pour l'ELC.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Besoins d'apports en eau durant la saison

Dans les sections suivantes, les résultats sont présentés selon les divers traitements de fertilisation, irrigués (I) ou non (I₀). Le nombre d'épisodes d'irrigation effectués pour chacun des traitements de fertilisation en 2011 et 2012 est donc résumé au Tableau 4. Cette compilation tient compte de la période où les irrigations ont été effectuées. Ces périodes ont été délimitées selon les diverses prises d'échantillons. Ainsi, la première période se termine le jour précédant l'apport de N par fractionnement, la 2^e période le jour précédant la prise d'échantillons du stade 50-75 % de floraison, la 3^e juste avant la prise d'échantillons du stade défanage et enfin la 4^e période se termine avec la récolte. De plus, à chacun des épisodes d'irrigation rapportés, toutes les parcelles d'un même traitement ont été irriguées puisque les lectures au tensiomètre de chacune des parcelles atteignaient la consigne de déclenchement de l'irrigation. Le nombre total d'épisodes d'irrigation par saison et par traitement est présenté à la droite du tableau. Ce total permet de constater que les traitements présentant dans les sections suivantes les meilleurs rendements, sont aussi ceux ayant demandé le plus d'épisodes d'irrigation.

Tableau 4. Nombre d'épisodes d'irrigation effectués par période en 2011 et 2012 dans les traitements irrigués.

Traitements	----- Périodes -----									
	Avant fractionnement		Entre le fractionnement et 50-75% de floraison		Entre la floraison et le défanage		Entre le défanage et la récolte		Total	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012	2011	2012
ECV50+ECV100	1	1	1	2	-	4	-	-	2	7
ECV50+ELC100	1	1	-	2	-	-	-	-	1	3
ECV50+ELC70	1	1	-	1	-	1	-	-	1	3
ELC150	1	1	-	3	-	3	-	-	1	7
TN0	1	1	-	-	-	1	-	-	1	2

3.2 Développement et nutrition des plants

La fertilisation azotée a eu un impact important sur la croissance des plants en saison pour les deux années, indiquant que le site répond aux apports d'azote et convient à l'essai réalisé. Ainsi, tant l'apport à la plantation (2011, $P = 0.0004$; 2012, $P = 0.0001$) que celui au fractionnement (2011, $P < 0.0001$; 2012, $P < 0.0001$) ont permis aux plants fertilisés de produire une masse sèche de 2 à 3,6 fois plus grande que les plants sans apport d'azote (TN0), les deux années (Tableau 5). Toutefois, le type de fertilisation n'a pas eu un impact constant. En 2011, en date du fractionnement, le type de fertilisation n'a pas fait de différence. Par contre, au stade floraison, des différences significatives ont été mesurées. Ainsi, tant pour les parcelles irriguées que non irriguées, les traitements ECV50+ECV100 et

ELC150 ont produit les plus gros plants, ayant une masse sèche de 31 % à 69 % plus élevée ($P < 0.0615-0.0001$) que celles des plants ECV50+ELC100 et ECV50+ELC70 qui avaient pour leur part des poids égaux. En 2012, dès le stade du fractionnement, les plants ELC150 avaient une masse sèche de 56 % supérieure ($P < 0.0349-0.0013$) à celles des autres plants fertilisés, dont les masses étaient égales (Tableau 5). Au stade floraison, les plants ELC150 avaient conservé leur avance, avec une masse sèche 66 % plus élevée ($P < 0.0045-0.0002$) que celles des autres plants fertilisés.

En ce qui a trait à l'irrigation, celle-ci a eu beaucoup moins d'effet que la fertilisation sur le développement des plants dans le cadre de l'étude actuelle. En effet, aucun impact de l'irrigation sur la croissance des plants n'a été établi en date du fractionnement, les deux années. Cette absence d'effet peut toutefois être attribuée au fait qu'à ce stade, à chacune des années, un seul épisode d'irrigation avait eu lieu (Tableau 4). Toutefois, en 2012, bien que plusieurs épisodes d'irrigation aient eu lieu entre le fractionnement et le stade floraison, l'apport d'eau n'a pas davantage entraîné de différence au niveau de la croissance des plants (Tableau 5). De plus, si en 2011 un effet significatif ($P < 0.0001$) de l'irrigation a été observé au stade floraison, celui-ci est questionnable. En effet, cet impact a été mesuré chez tous les plants fertilisés en N, bien que seuls ceux du traitement ECV50+ECV100 aient reçu un épisode d'irrigation supplémentaire suivant le fractionnement (Tableau 4). Il se pourrait donc qu'un facteur autre que la disponibilité en eau, mais lié au fait d'irriguer, ait causé cet impact. De plus, si l'impact est vraiment lié à l'irrigation, celle-ci a nui au développement des plants puisque les plants irrigués présentaient une masse sèche de 1,25 à 2,1 fois moindre que celles des plants non irrigués ($P = 0,0344-0.0002$).

Tableau 5. Poids en matière sèche des plants en cours de saison selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation en 2011 et 2012.

Stades et traitements [†]	----- Matière sèche (g plant ⁻¹) -----			
	----- 2011 -----		----- 2012 -----	
	I0	I	I0	I
Avant fractionnement				
ECV 50 + ECV 100	18	21	14	13
ECV 50 + ELC 100	19	21	16	20
ECV 50 + ELC 70	18	28	15	15
ELC150	23	25	22	26
TN0	9	8	8	5
Floraison (50-75%)				
ECV 50 + ECV 100	56	39	42	39
ECV 50 + ELC 100	43	29	39	30
ECV 50 + ELC 70	43	21	38	25
ELC150	57	45	59	59
TN0	18	11	13	13

[†] Les symboles I, I0 et TN0 identifient les traitements irrigués, non irrigués et le témoin non fertilisé en N, respectivement.

Le suivi du statut nutritionnel azoté des plants révèle que l'effet positif de la fertilisation azotée sur le développement des plants a, entre autres, passé par une meilleure nutrition azotée. Ainsi, les deux années, l'application d'engrais a grandement haussé la teneur en N foliaire (Tableau 6). L'impact positif est mesurable dès la dose de plantation les

deux années ($P < 0.0001$). Ainsi, juste avant le fractionnement du N, tous les plants fertilisés avaient une teneur foliaire en N bien au-dessus du seuil de suffisance ($> 35\ 000\ \text{mg kg}^{-1}$) et supérieure à celle des plants TN0 qui présentaient une concentration foliaire en N sous ce seuil. De plus, tel qu'observé pour la masse sèche, les plants ELC150 présentaient une valeur supérieure à celles des autres plants fertilisés en N en 2011 (+ 23 %) ($P < 0.0045-0.0002$) et 2012 (+ 20 %) ($P < 0.0535-0.0001$). Au stade floraison, en 2011, les plants fertilisés présentaient toujours des teneurs foliaires en N suffisantes, supérieures ($P < 0.0025-0.0001$) à celles des plants TN0. Les plants ECV50+ECV100 et ELC150, ayant des valeurs similaires, présentaient des teneurs supérieures ($P < 0.0216-0.0008$) à celles des autres plants fertilisés en N. En 2012, étant donné une interaction [Irrigation x Fertilisation] ($P = 0.0293$), le type d'engrais a eu un impact seulement dans les parcelles irriguées. Dans ces parcelles, les plants ECV50+ECV100 présentaient des teneurs en N foliaire supérieures ($P < 0.0572-0.0131$) à celles des plants ECV50+ELC100 et ECV50+ELC70, mais similaires à celles des plants ELC150. Par contre, il n'y avait pas de différences entre les différents plants ayant reçu de l'engrais à libération lente. Dans les parcelles non irriguées, le type de fertilisation n'a eu aucun impact.

Tableau 6. Nutrition azotée des plants en cours de saison selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation en 2011 et 2012.

Stades et traitements [†]	----- Teneur en N (mg kg ⁻¹) -----			
	-----2011-----		-----2012-----	
	I0	I	I0	I
Avant fractionnement				
ECV 50 + ECV 100	41500	43067	45800	44533
ECV 50 + ELC 100	40967	42567	47533	44500
ECV 50 + ELC 70	39167	42800	46633	45867
ELC150	51800	50967	55133	54900
TN0	32600	30567	36467	33533
Floraison (50-75%)				
ECV 50 + ECV 100	46900	46367	42100	47333
ECV 50 + ELC 100	40033	41533	37167	41567
ECV 50 + ELC 70	38200	40500	37700	39533
ELC150	42833	43000	42633	42933
TN0	35067	36167	34133	30667

[†] Les symboles I, I0 et TN0 identifient les traitements irrigués, non irrigués et le témoin non fertilisé en N, respectivement.

3.3 Développement des tubercules

La production en tubercules des plants de pommes de terre de chacune des parcelles a fait l'objet d'un suivi durant la saison 2011 et celle de 2012. Pour donner une échelle de comparaison des poids, des tubercules de différents poids ont été photographiés sur un papier quadrillé aux 2,54 cm (Figure 10). Selon le traitement, les tubercules ont ainsi été regroupés en fonction de leur poids ou de leur grosseur lorsque ces derniers avaient un diamètre inférieur à 0,5 mm (Figure 11 à Figure 14). Afin de faciliter la compréhension des résultats, le nombre de tubercules pour chacun des cinq traitements est présenté à gauche ou

à droite de l'axe vertical selon qu'il s'agisse d'un traitement irrigué ou non. Il faut ainsi considérer les valeurs négatives à gauche de l'axe vertical comme positives. À titre d'exemple, à la Figure 11, pour la première classe de poids (tubercules qui avaient entre 50 et 100 g), le traitement ECV50 + ECV100 présente un peu plus de 16 tubercules par plant pour les parcelles irriguées, alors que ce nombre est inférieur à 13 pour les parcelles non irriguées.

La plupart des tubercules récoltés en juillet 2011 et 2012 se retrouvent dans les classes « < 0,5 cm et 0-50 g » (Figure 11 et Figure 13). À ce moment de la saison, peu de tubercules se retrouvent dans les classes supérieures, ce qui est tout à fait habituel à ce stade sous nos conditions. Toutefois, en 2011, davantage de tubercules semblent se retrouver dans les classes 50-100 g et 100-150 g pour les parcelles non irriguées. Les récoltes suivantes, du 28 septembre 2011 et du 25 septembre 2012 (Figure 12 et Figure 14), permettent par la suite d'apprécier le grossissement des tubercules depuis le suivi effectué précédemment en juillet. À cette date, les récoltes de septembre 2011 et 2012 diffèrent en ce qui a trait à la distribution des tubercules dans les différentes classes. Un plus grand nombre de tubercules se retrouvent dans les classes de poids inférieurs en 2012, alors que les classes supérieures sont davantage occupées en 2011. Ceci concorde avec le fait que les rendements de 2011 ont d'ailleurs été plus élevés que ceux de 2012. De plus, le témoin sans apport de N (TN0) est pratiquement absent des classes supérieures, peu importe la saison.

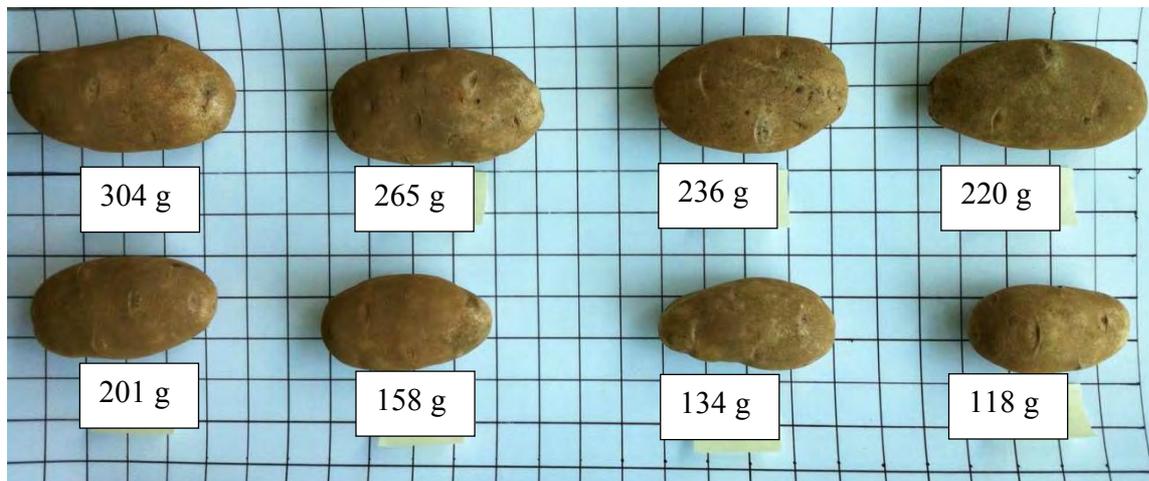


Figure 10. Tubercules de poids différents photographiés sur papier quadrillé aux 2,54 cm (1 po.).

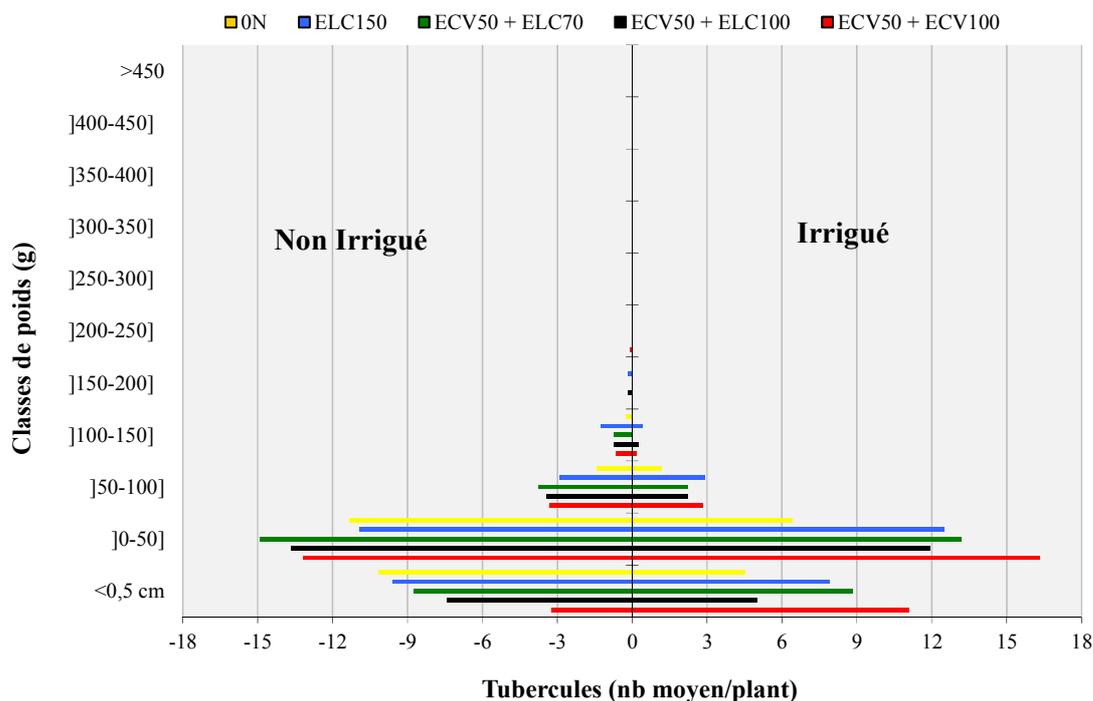


Figure 11. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids unitaire de ces derniers et le traitement au 28 juillet 2011.

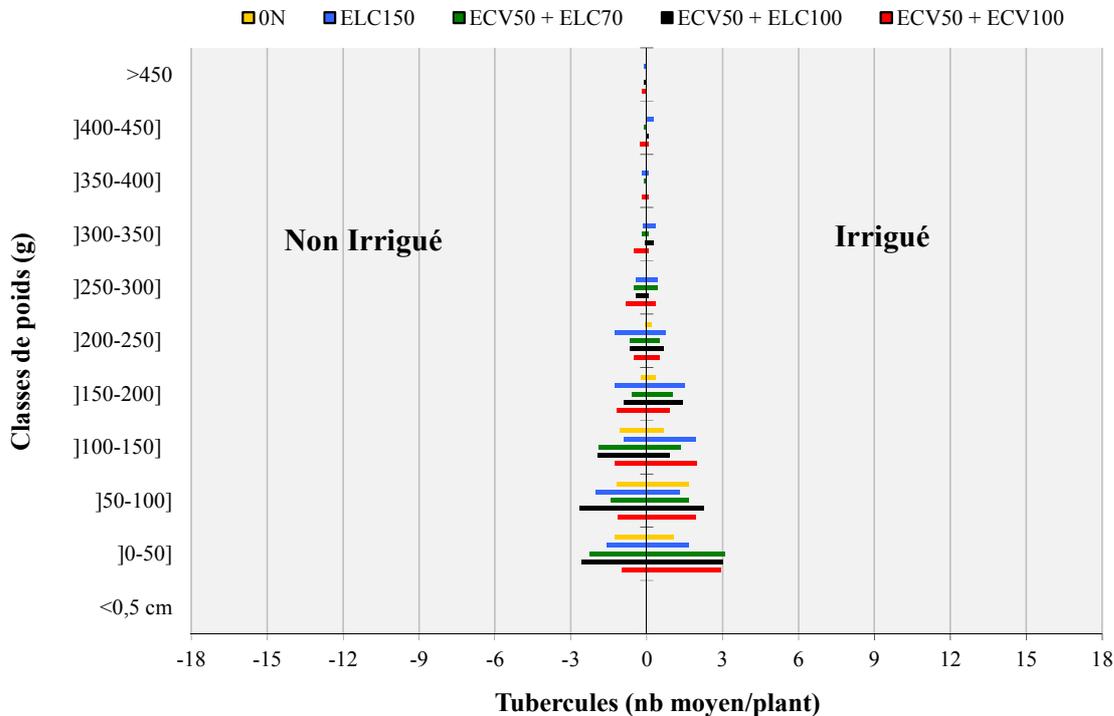


Figure 12. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids unitaire de ces derniers et le traitement au 28 septembre 2011.

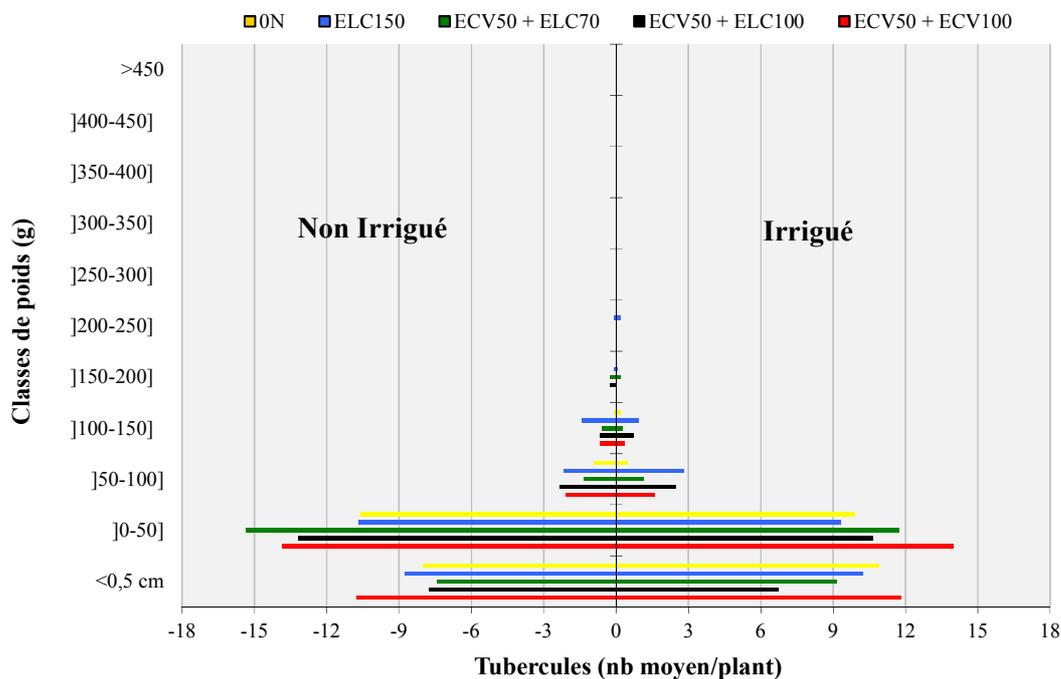


Figure 13. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids unitaire de ces derniers et le traitement au 16 juillet 2012.

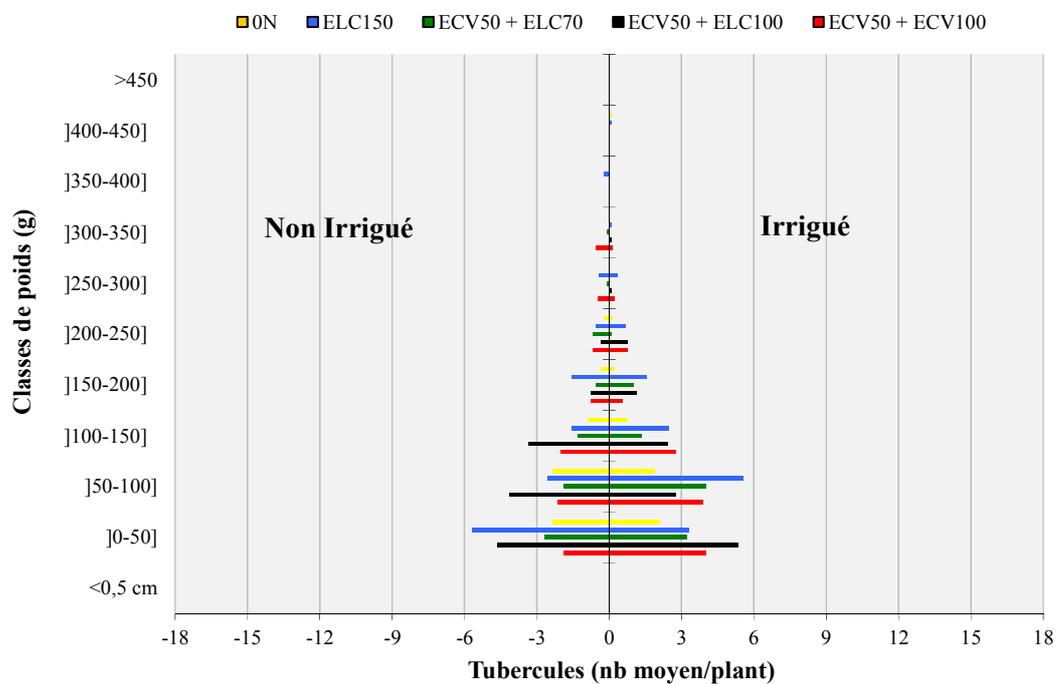


Figure 14. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids unitaire de ces derniers et le traitement au 25 septembre 2012.

Les tubercules récoltés lors des suivis périodiques sont également présentés à l'aide de graphiques selon le poids total du lot, et ce, sans référence à leur poids unitaire ou qu'ils soient vendables ou non (Figure 15 à Figure 18). Ainsi, au 28 juillet 2011, les poids totaux récoltés apparaissent plus élevés pour l'ensemble des traitements en absence d'irrigation (Figure 15). Au terme de la saison, au 28 septembre, cette tendance ne perdure toutefois que pour le ECV50+ECV100 (Figure 16). En 2012, les poids obtenus pour les différents traitements sont comparables à ceux mesurés en 2011 (Figures 17 et 18). Toutefois, les plants des parcelles non irriguées ne semblent pas présenter un plus grand poids en tubercule en juillet. Le même constat s'observe au terme de la saison, où en fait la seule différence tient au fait que le ELC150 présente apparemment un poids total en tubercules plus élevé dans les parcelles irriguées. L'irrigation semble donc avoir été profitable à ce dernier en 2012. Les deux années, les traitements ECV50+ECV100 et ELC150 sont donc ceux qui présentent les meilleurs poids totaux par plant. À l'opposé, le traitement ECV50+ELC70 semble moins bien performer que les autres traitements fertilisés en N (Figure 18).

Une autre façon de discuter les résultats est de comparer, selon que les tubercules aient ou non été irrigués, la proportion du poids total produit au terme de la saison (septembre) qui avait été atteinte lors du suivi réalisé en juillet (Tableau 7). Ce calcul permet ainsi de constater, au 28 juillet 2011, que les plants non irrigués avaient produit entre 38 et 65 % de leur production finale, tandis que les plants du traitement irrigué en avaient produit entre 31 et 40 %. Dans le cas du traitement ECV50+ECV100, la proportion de poids produit est la même dans les traitements irrigués et non irrigués. Toutefois, pour toutes les autres régies, les traitements non irrigués avaient une longueur d'avance comparativement aux traitements irrigués. Cette tendance s'observe également en 2012 pour les traitements ayant des apports en N. De plus, tant en 2011 qu'en 2012, en contexte non irrigué, les traitements ayant reçu des apports d'engrais ELC étaient plus avancés que celui n'ayant reçu que de l'engrais conventionnel.

Tableau 7. Proportion du poids produit en juillet par les plants en comparaison du poids total produit au terme de la saison pour 2011 et 2012.

Traitements	-----2011-----		-----2012-----	
	I0	I	I0	I
ECV50 + ECV100	37,8	36,8	32,4	25,5
ECV50 + ELC100	46,6	35,3	38,8	34,7
ECV50 + ELC70	50,5	32,2	49,3	30,6
ELC150	47,0	30,6	42,3	35,3
TN0	64,6	39,2	33,0	33,6

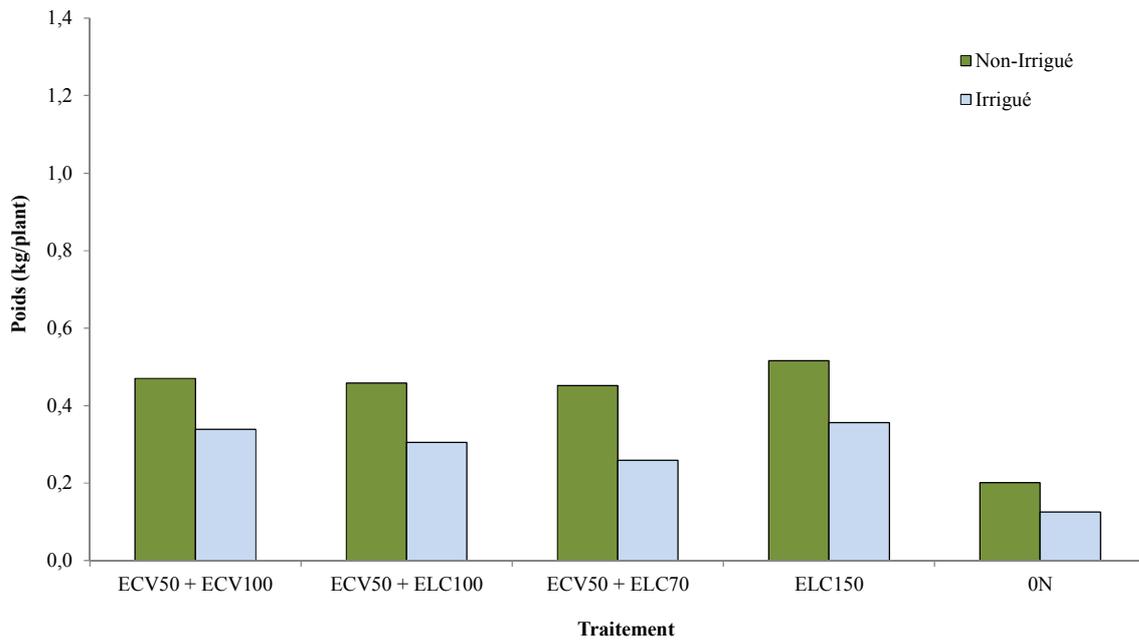


Figure 15. Suivi périodique du poids total moyen en tubercules par plant selon le traitement au 28 juillet 2011.

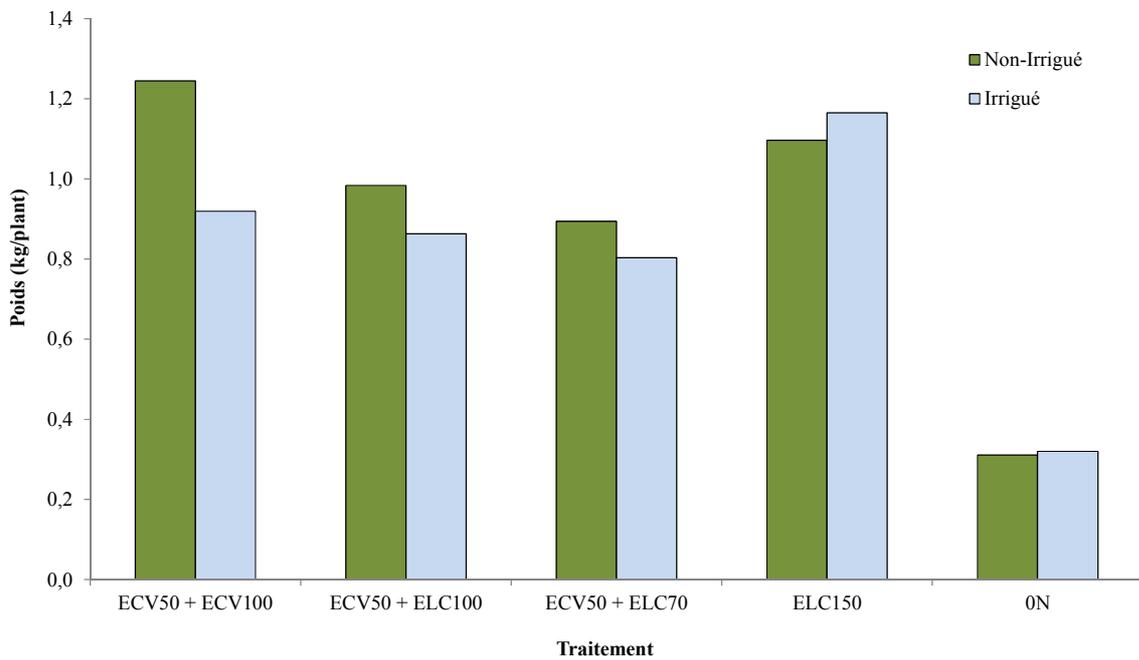


Figure 16. Suivi périodique du poids total moyen en tubercules par plant selon le traitement au 28 septembre 2011.

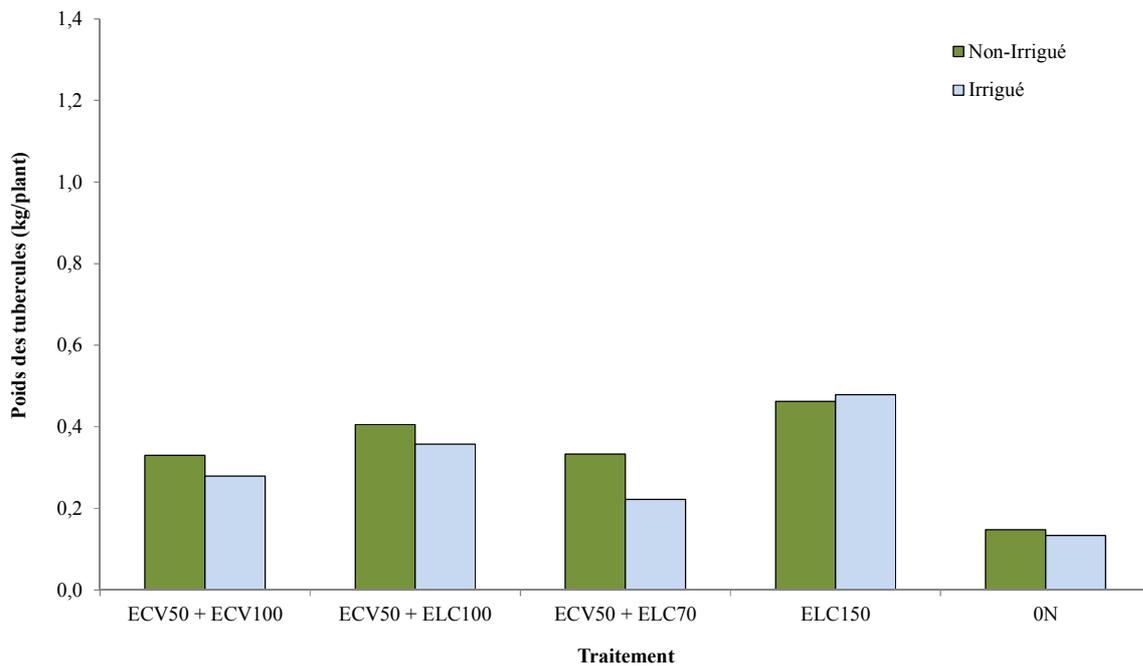


Figure 17. Suivi périodique du poids total moyen en tubercules par plant selon le traitement au 16 juillet 2012.

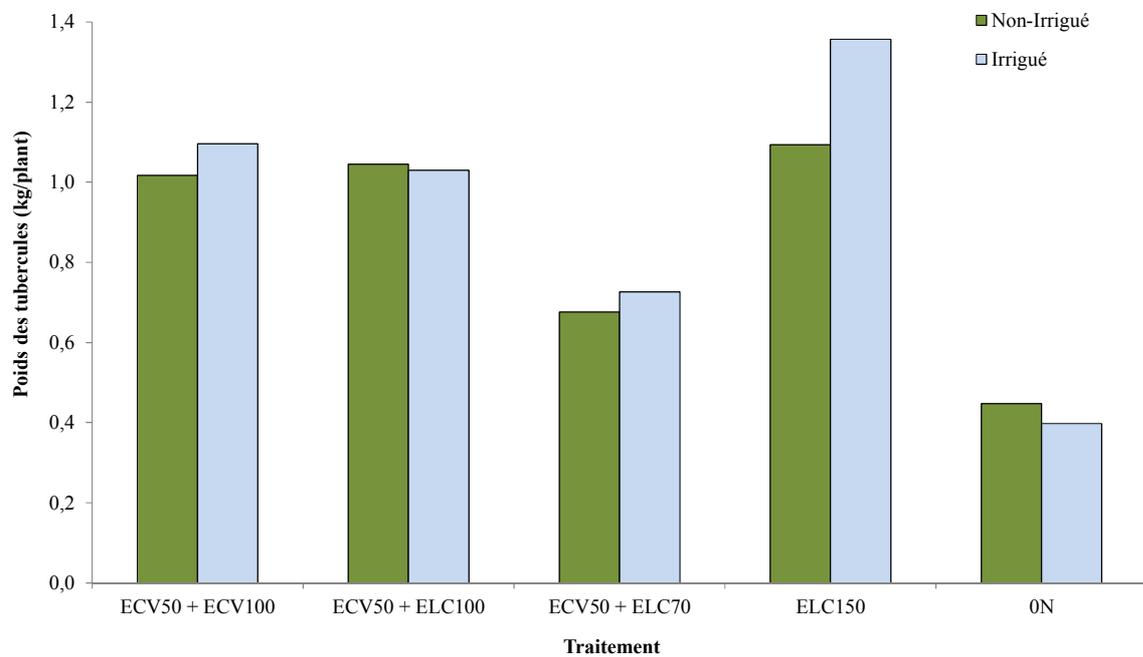


Figure 18. Suivi périodique du poids total moyen en tubercules par plant selon le traitement au 25 septembre 2012.

Par ailleurs, la masse sèche unitaire des plants au stade floraison pour chacune des 30 parcelles a été mise en relation avec le nombre de tubercules produits par ces plants selon la classe de poids à laquelle il appartient (Figure 19 à Figure 22). Ces relations font intervenir le coefficient de régression R^2 , qui peut être exprimé en pourcentage¹, dont la résultante permet de mesurer l'ordre de grandeur de la relation entre deux variables. Plus ce coefficient est élevé, plus la variation d'un facteur explique la variation du second facteur. Les R^2 obtenus pour les quatre corrélations effectuées indiquent une relation relativement forte entre la matière sèche des plants et le nombre de tubercules qu'un plant peut produire. Autrement dit, plus la masse sèche d'un plant est élevée, plus la probabilité que ce plant produise un plus grand nombre de tubercules que ceux ayant une masse sèche plus faible est élevée. Pour la récolte du 28 juillet 2011, ces R^2 sont respectivement de 0,39 et 0,43 pour le nombre de tubercules étant dans les classes 50-100 g et 100-150 g (

Figure 19 et Figure 20). En juillet 2012, les R^2 obtenus pour les mêmes classes de poids sont respectivement de 0,36 et 0,53 (Figure 21 et Figure 22). Une masse sèche unitaire plus élevée indique un plant ayant un meilleur potentiel photosynthétique. Cette situation peut être avantageuse pour la production en tubercules. Cela pourrait expliquer en partie l'observation d'un plus grand nombre de tubercules dans la classe 100-150 g pour les plants ayant un poids en matière sèche plus élevé.

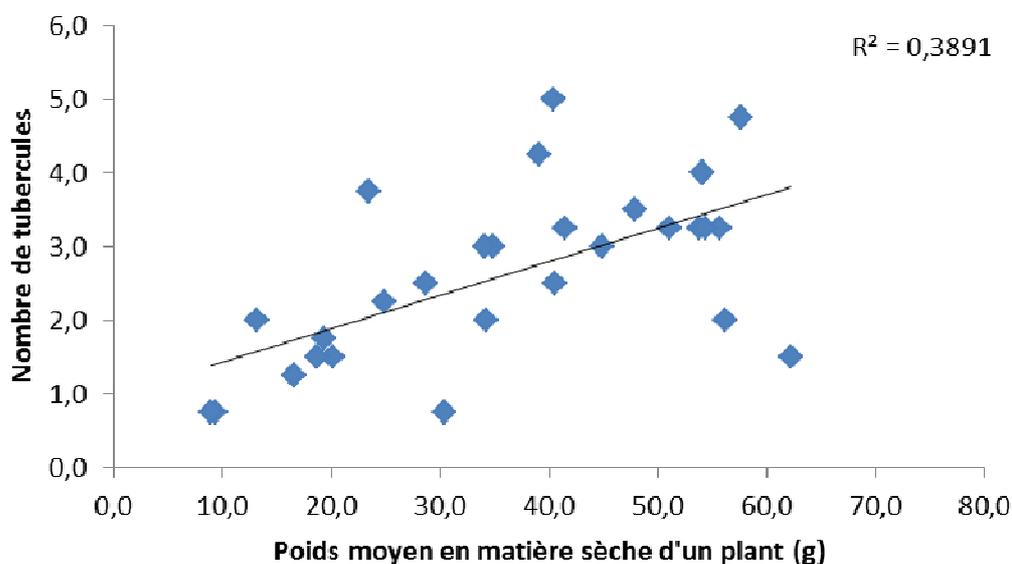


Figure 19. Corrélation entre le poids moyen en matière sèche d'un plant de chacune des 30 parcelles et le nombre moyen en tubercules produits par ces plants ayant un poids compris entre 50 et 100 g au 28 juillet 2011.

¹ Il faut extraire la racine carrée du coefficient R^2 pour obtenir la correspondance en pourcentage. Par exemple, un R^2 de 0,3891 équivaut à 62,4 %.

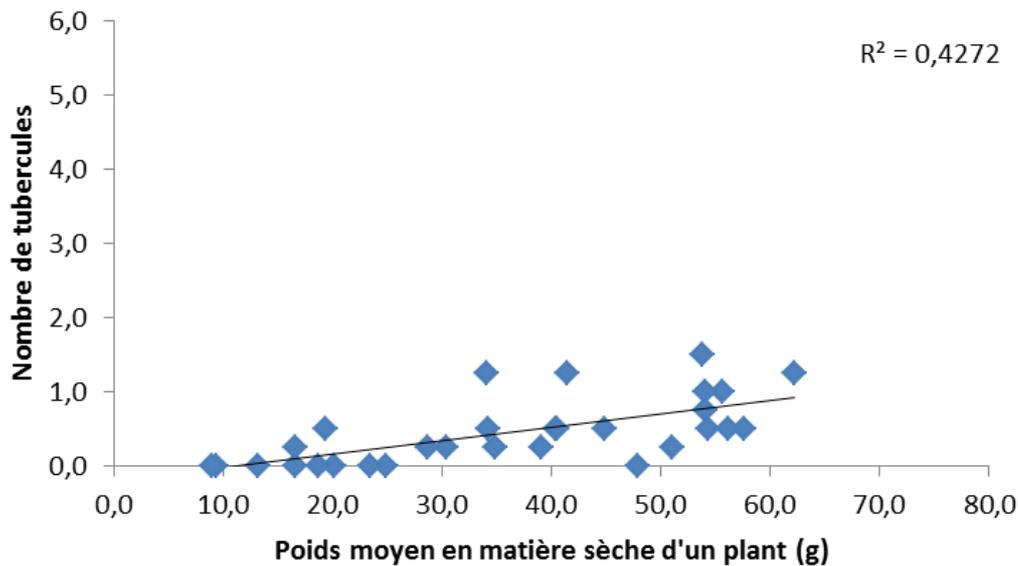


Figure 20. Corrélation entre le poids moyen en matière sèche d'un plant de chacune des 30 parcelles et le nombre moyen en tubercules produits par ces plants ayant un poids compris entre 100 et 150 g au 28 juillet 2011.

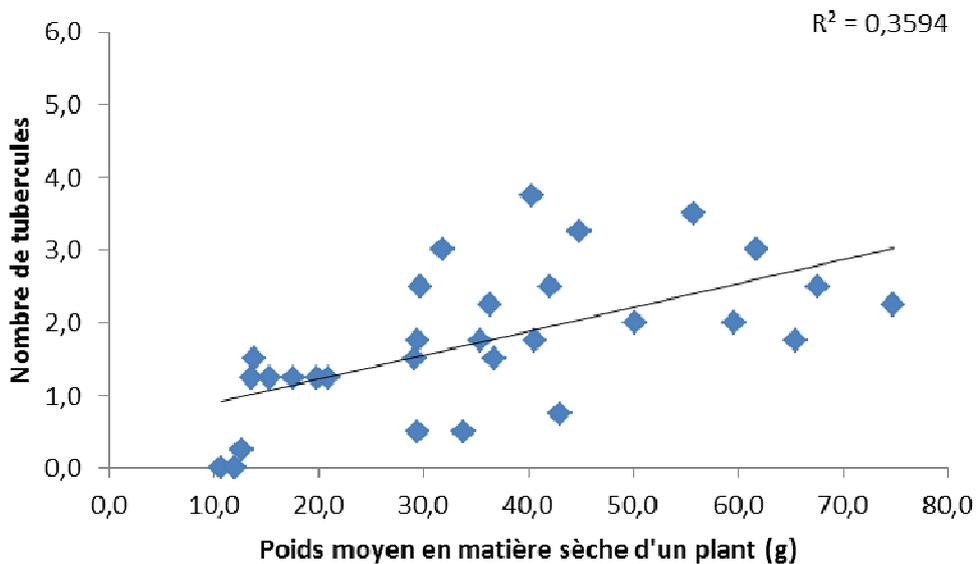


Figure 21. Corrélation entre le poids moyen en matière sèche d'un plant de chacune des 30 parcelles et le nombre moyen en tubercules produits par ces plants ayant un poids compris entre 50 et 100 g au 16 juillet 2012.

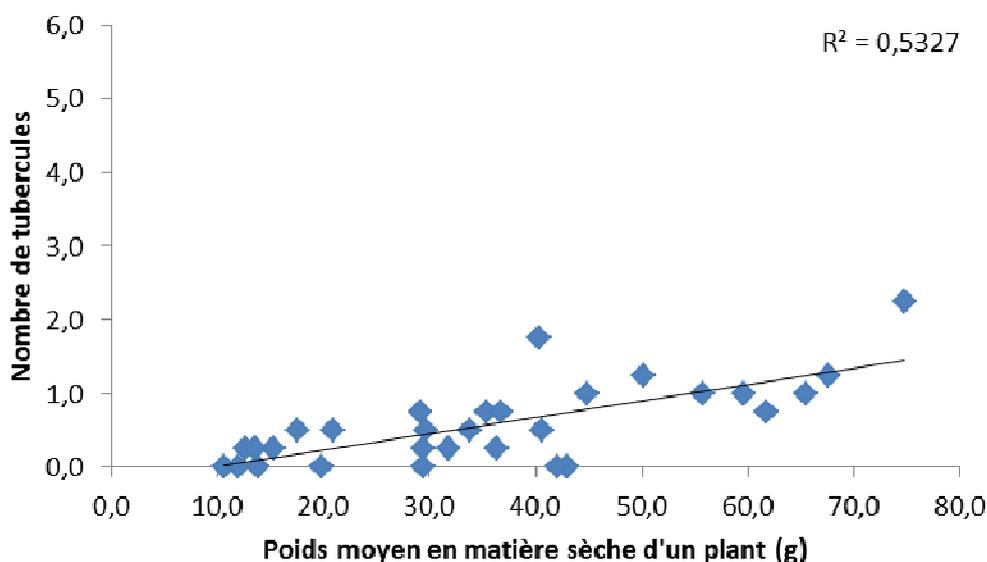


Figure 22. Corrélation entre le poids moyen en matière sèche d'un plant de chacune des 30 parcelles et le nombre moyen en tubercules produits par ces plants ayant un poids compris entre 100 et 150 g au 16 juillet 2012.

Le poids moyen en matière sèche d'un plant pour chacun des dix traitements a aussi été mis en relation avec le poids moyen en tubercules produits par ces plants en 2011 et 2012 (Figure 23 et Figure 24). Il en ressort que cette relation est très forte en 2011 ($R^2 = 0,85$) et relativement forte en 2012 ($R^2 = 0,40$). En l'occurrence, le potentiel de rendement total en tubercules d'un plant peut donc être expliqué par son poids en matière sèche. De la même façon, selon les corrélations établies entre le poids en masse sèche des plants en juillet et le taux d'utilisation du N des engrais (plant et tubercule) à cette même date, la masse des plants est fortement reliée à l'utilisation réalisée du N des engrais à ce moment (Figure 25 et Figure 26). En fait, la masse sèche des plants en juillet demeure même assez bien corrélée aux CUA finaux du N des engrais (Figure 27 et Figure 28).

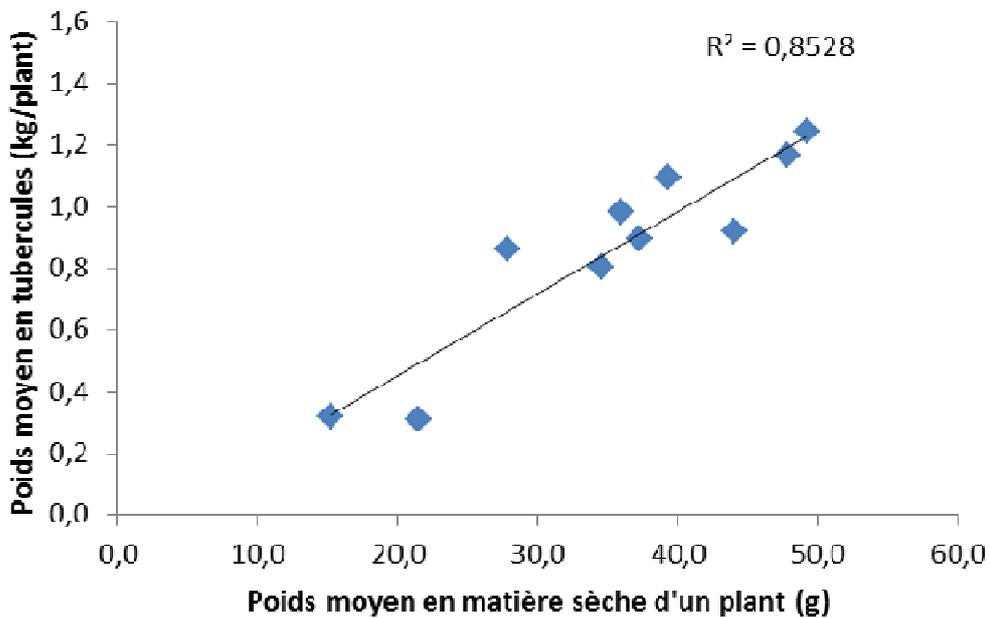


Figure 23. Corrélation entre la masse sèche individuelle des plants des 10 traitements en juillet et le poids moyen en tubercules produits au final par ces plants en 2011.

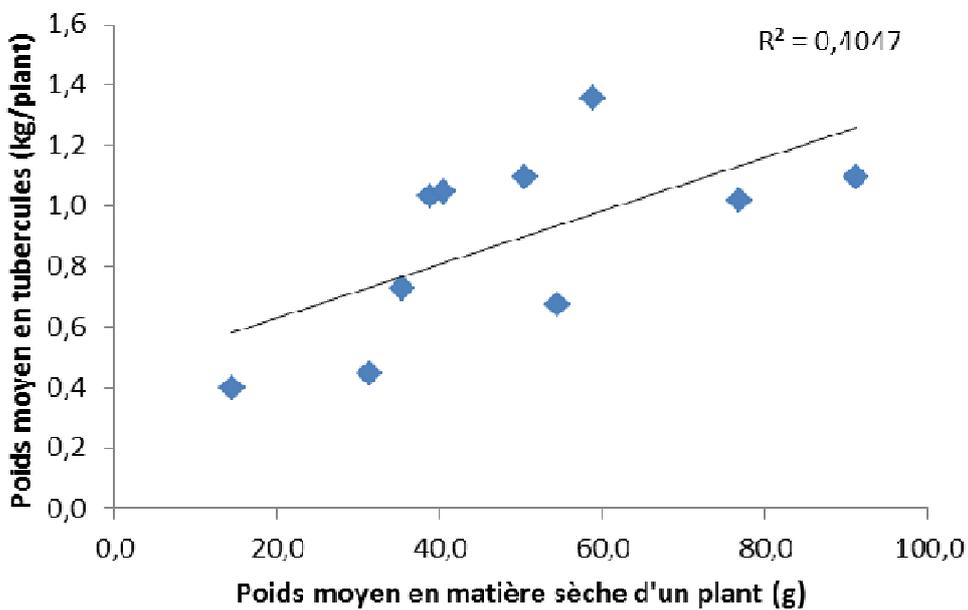


Figure 24. Corrélation entre la masse sèche individuelle des plants des 10 traitements en juillet et le poids moyen en tubercules produits au final par ces plants en 2012.

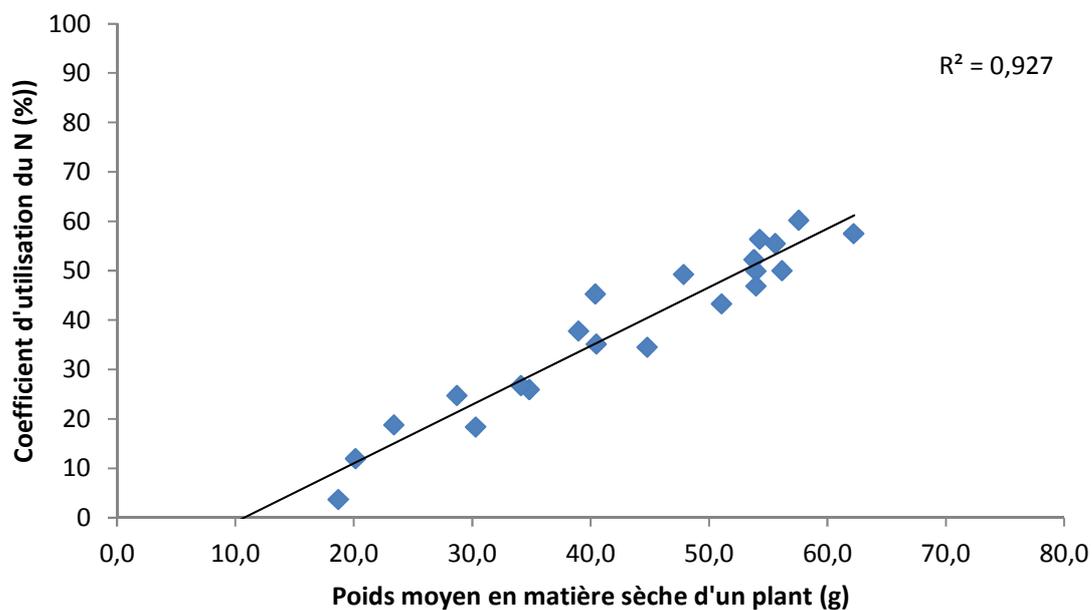


Figure 25. Corrélation entre la masse sèche individuelle des plants des traitements fertilisés en N en juillet et le taux d'utilisation du N des engrais au même stade 2011.

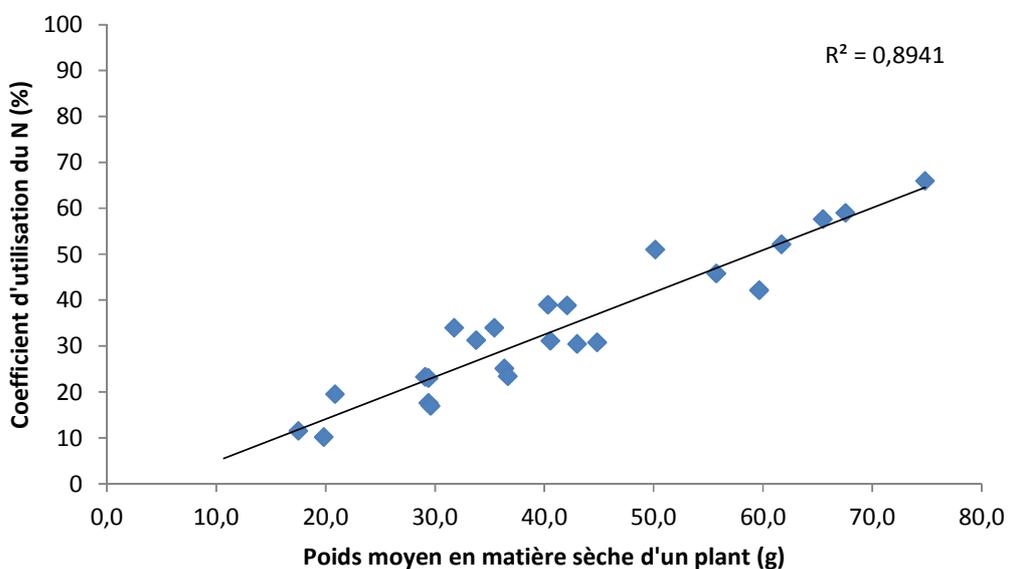


Figure 26. Corrélation entre la masse sèche individuelle des plants des traitements fertilisés en N en juillet et le taux d'utilisation du N des engrais au même stade 2012.

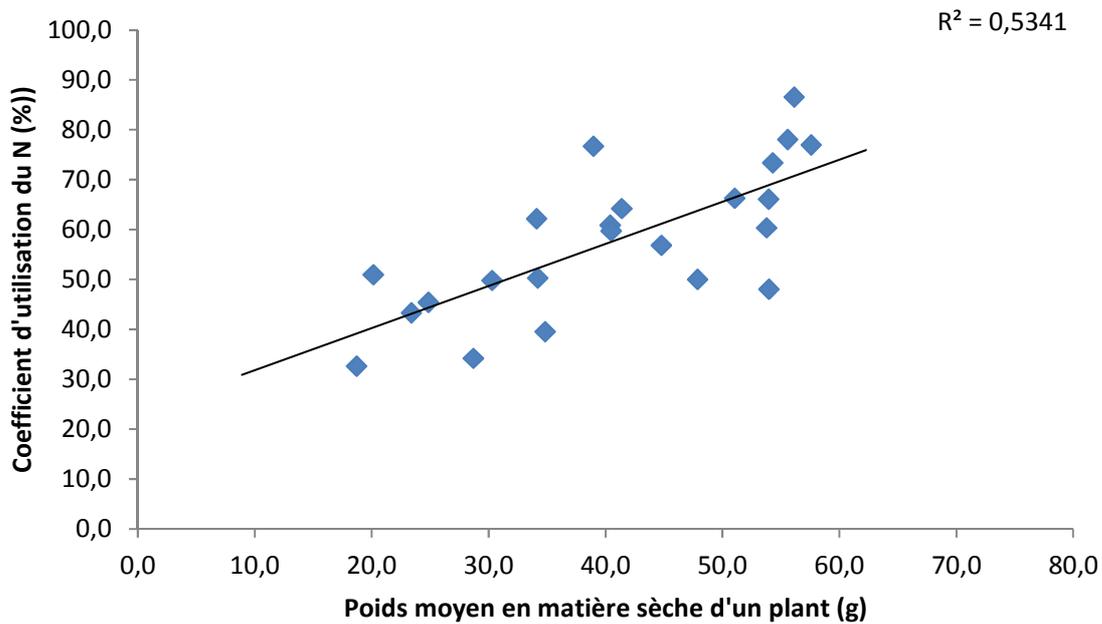


Figure 27. Corrélation entre le poids moyen en matière sèche d'un plant pour chacun des traitements fertilisés en N et le taux d'utilisation final du N des engrais à la récolte en 2011.

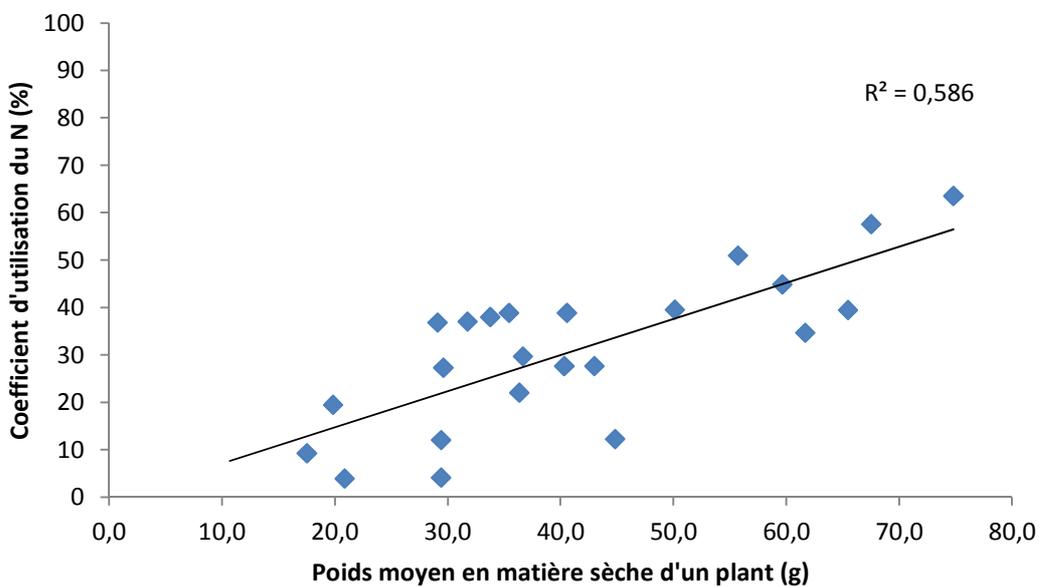


Figure 28. Corrélation entre le poids moyen en matière sèche d'un plant pour chacun des traitements fertilisés en N et le taux d'utilisation final du N des engrais à la récolte en 2012.

3.4 Azote disponible du sol

En 2011, l'apport de fertilisants azotés à la plantation a modifié significativement le contenu en N minéral disponible (N_{\min}) ($N-NH_4 + N-NO_3$) du sol ($P = 0.0473$) et différemment selon le type d'engrais (Tableau 8). Ainsi, juste avant l'apport fractionné de N, le sol des parcelles fertilisées contenait entre 39 et 50 kg $N_{\min} ha^{-1}$, comparativement à 20 kg $N_{\min} ha^{-1}$ dans les parcelles sans apport de N (TN0). Six semaines après l'application des engrais à la plantation, les sols fertilisés contenaient donc de 19 à 30 kg $N_{\min} ha^{-1}$ de plus que le sol non fertilisé, en comparaison des 50 kg ha^{-1} apportés à ces parcelles au printemps et même 150 kg ha^{-1} pour le traitement ELC150. À ce stade, il est intéressant de noter que le sol des parcelles ayant reçu 150 unités de N sous forme d'engrais à libération contrôlée (ELC150) dès la plantation ne contenait pas davantage de N_{\min} que celui des autres parcelles fertilisées. En fait, seul le sol de ces parcelles avait une charge en N_{\min} qui n'était pas significativement plus élevée que celle du sol non fertilisé en N (TN0). Étant donné que c'est aussi dans ces parcelles que les plants tendaient à être les plus développés, cette teneur plus faible en N_{\min} du sol des parcelles ELC150 apparaît davantage due à un prélèvement accru du N disponible du sol par les plants qu'à une mise en disponibilité moindre du N de l'engrais ELC. En 2012, l'apport de fertilisants azotés à la plantation tendait ($P = 0.1454$) aussi à hausser le contenu en N_{\min} du sol, se situant entre 21 et 35 kg $N_{\min} ha^{-1}$, comparativement à 16 kg $N_{\min} ha^{-1}$ dans le sol non fertilisé en N (TN0) et cela, sans effet du type d'engrais (Tableau 9). Six semaines après l'application des engrais, les sols fertilisés contenaient donc de 5 à 17 kg $N_{\min} ha^{-1}$ de plus que le sol non fertilisé, en comparaison des 50 kg ha^{-1} ajoutés à ces parcelles au printemps et même 150 kg ha^{-1} pour le traitement ELC150.

Au stade de la floraison, soit une vingtaine de jours après l'apport de N au fractionnement, un impact important de celui-ci sur le contenu en N_{\min} du sol a été mesuré les deux années (2011, $P = 0.0127$; 2012, $P = 0.0043$), différent selon le type d'engrais. Ainsi, les deux années, le sol des parcelles TN0 ne contenait que 20 % du N_{\min} présent dans les parcelles fertilisées en N. En 2011, à l'instar de ce qui avait été observé juste avant le fractionnement, c'est le sol des parcelles ELC150 qui contenait le moins de N_{\min} par rapport aux autres parcelles fertilisées en N dont les charges en N_{\min} étaient similaires (Tableau 8). Ceci concorde encore une fois avec le fait que les plants des parcelles ELC150 étaient dans ceux ayant produit la plus forte croissance et donc, probablement, un prélèvement intensif du N disponible du sol. De plus, puisque l'engrais ELC150 est enrobé, une partie du N_{\min} disponible qu'il contient est possiblement resté hors d'atteinte de l'extractif, sous-estimant le N_{\min} potentiellement disponible du sol de ces parcelles. En 2012, une situation similaire était observée, avec la distinction que l'irrigation ($P = 0.0490$) a aussi entraîné des modifications de la teneur en N_{\min} du sol (Tableau 9). Ainsi, le sol des parcelles ayant reçu l'engrais à libération lente présentait une charge en N_{\min} inférieure à celle du sol n'ayant reçu que de l'engrais conventionnel (ECV50+ECV100), la différence étant particulièrement marquée pour le traitement ELC150 qui a aussi présenté le meilleur développement des plants. Du point de vue de l'irrigation, les sols ayant été irrigués contenaient globalement moins de N_{\min} (18 à 84 kg $N_{\min} ha^{-1}$) que les non-irrigués (58 à 126 kg $N_{\min} ha^{-1}$).

Puisque le ELC est constitué à 100 % d'urée, tandis que le 27-0-0 est constitué de nitrate et d'ammonium à parts égales, des différences étaient attendues quant au contenu en N-NH₄ du sol selon le type de fertilisation. Toutefois, au stade fractionnement, tant en 2011 qu'en 2012, le sol des parcelles fertilisées en tout ou en partie avec du ELC ne contenait ni plus ni moins de N-NH₄ (2011, $P = 0.1282$; 2012, $P = 0.2860$) que celui des parcelles fertilisées uniquement avec l'engrais conventionnel. Au stade floraison, les deux années, le sol des parcelles ELC150 ayant reçu la totalité du N sous forme de NH₄ à la plantation contenait même drastiquement moins de N-NH₄ que le sol des autres parcelles fertilisées (2011, $P = 0.0456$; 2012, $P = 0.0033$). En 2011, indépendamment de l'irrigation, le sol des parcelles ELC150 ne contenait donc que 3 kg N-NH₄ ha⁻¹, comparativement à 34 à 50 kg N-NH₄ ha⁻¹ dans le sol des autres parcelles fertilisées en N. En 2012, le sol des parcelles ELC150 non irriguées tendait aussi à contenir moins de N-NH₄ (39 kg N-NH₄ ha⁻¹) que le sol des autres parcelles fertilisées en N (41 à 104 kg N-NH₄ ha⁻¹), mais c'est dans les parcelles irriguées que la différence était la plus marquée, avec 3 kg N-NH₄ ha⁻¹ dans le sol des parcelles ELC150, comparativement à 19 à 47 kg N-NH₄ ha⁻¹ dans le sol des autres parcelles fertilisées en N. Ces données suggèrent que le N-NH₄ du ELC150, en contact avec le sol depuis neuf semaines, a été activement nitrifié en N-NO₃ et prélevé puisque les masses de plants et les prélèvements en N de ce traitement sont parmi les plus élevés (Tableau 5 et Tableau 11) et le lessivage de N-NO₃ parmi les plus bas (Figure 32).

Tableau 8. Contenu en azote disponible du sol en cours de saison selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, été 2011.

Traitements [†]	---- N-NH ₄ (kg ha ⁻¹) ----		---- N-NO ₃ (kg ha ⁻¹) ----		----- N _{min} (kg ha ⁻¹) [‡] ----	
	I0	I	I0	I	I0	I
Avant fractionnement						
ECV 50 + ECV 100	0,9	1,3	36	55	40	61
ECV 50 + ELC 100	0,9	1,2	50	33	54	39
ECV 50 + ELC 70	0,8	0,9	53	43	57	48
ELC150	0,8	0,7	25	36	29	48
TN0	0,7	0,7	20	13	23	17
Floraison (50-75%)						
ECV 50 + ECV 100	48	49	61	38	109	87
ECV 50 + ELC 100	46	54	18	19	64	73
ECV 50 + ELC 70	36	32	26	27	61	59
ELC150	4	3	12	10	15	13
TN0	3	3	12	8	15	11

[†] Les symboles I, I0 et TN0 identifient les traitements irrigués, non irrigués et le témoin non fertilisé en N, respectivement.

[‡] Le N_{min} est la somme du N-NH₄ et du N-NO₃.

Tableau 9. Contenu en azote disponible du sol en cours de saison selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, été 2012.

Traitements [†]	----- N-NH ₄ (kg ha ⁻¹) --		----- N-NO ₃ (kg ha ⁻¹) --		----- N _{min} (kg ha ⁻¹) ‡ --	
	--		--		--	
	I0	I	I0	I	I0	I
Avant fractionnement						
ECV 50 + ECV 100	3	3	21	18	24	21
ECV 50 + ELC 100	4	3	20	15	24	18
ECV 50 + ELC 70	4	7	31	23	35	30
ELC150	32	3	21	13	53	17
TN0	3	3	14	12	18	15
Floraison (50-75%)						
ECV 50 + ECV 100	41	19	77	53	118	73
ECV 50 + ELC 100	104	33	22	22	126	55
ECV 50 + ELC 70	51	47	25	36	76	84
ELC150	39	3	19	14	58	18
TN0	3	2	11	11	15	13

[†] Les symboles I, I0 et TN0 identifient les traitements irrigués, non irrigués et le témoin non fertilisé en N, respectivement.

[‡] Le N_{min} est la somme du N-NH₄ et du N-NO₃.

3.5 Rendements vendables

À chacune des années, la culture a grandement répondu aux apports de N (2011 et 2012, $P < 0.0001$) avec des rendements grandement supérieurs dans les parcelles fertilisées comparativement au TN0. Ainsi, en 2011, de 16 à 27 T ha⁻¹ de tubercules vendables de plus ont été produits dans les parcelles fertilisées en N, où le plus haut rendement vendable atteignait 35 T ha⁻¹ (Figure 29). En 2012, les rendements vendables obtenus étaient plus bas que ceux de 2011 (Figure 30), avec une production vendable maximale de 21 T ha⁻¹, mais la quantité supplémentaire de tubercules produits grâce à la fertilisation en N est restée similaire à celle de 2011, avec de 13 à 24 T ha⁻¹ de plus de tubercules vendables produits dans les parcelles fertilisées en N, comparativement au TN0. Les rendements moindres obtenus en 2012 s'expliquent en partie par la présence de 'boulage', observé à partir de la mi-juillet. Cependant, ce phénomène a été retrouvé dans toutes les parcelles du projet et les résultats entre parcelles demeurent ainsi comparables.

Cet impact positif de la fertilisation a toutefois été modulé selon le type d'engrais et le temps d'application. Ainsi, les deux années, il ressort que l'apport de ELC au fractionnement a désavantagé la production de tubercules. L'engrais a probablement trop tardé à libérer des quantités suffisantes de N pour soutenir le développement des plants et la production de tubercules. En comparaison, l'apport de toute la dose de N sous forme de ELC à la plantation a permis d'excellents rendements, parmi les meilleurs les deux années. La culture a donc davantage bénéficié d'un apport supérieur de ELC en début de saison. La fertilisation usuelle (ECV50+ECV100 I₀) a également produit certains des meilleurs rendements. En 2011, c'est en fait le traitement qui a produit le rendement vendable le plus

élevé de tous, dépassant de 6 et 17 T ha⁻¹ les rendements produits avec les autres fertilisations. En 2012, les rendements les plus élevés, par ailleurs égaux, ont encore une fois été obtenus avec la fertilisation usuelle (ECV50+ECV100), ainsi que celle apportant tout l'engrais ELC à la plantation (ELC150). Leur rendement moyen, de 19 T ha⁻¹, dépassait significativement de 5 et 10 T ha⁻¹ ceux produits avec les régies ECV50+ELC100 et ECV50+ELC70, respectivement. De plus, entre ces deux derniers traitements, la fertilisation ECV50+ELC100 a permis de récolter 5 T ha⁻¹ de plus que l'autre fertilisation mixte, apportant moins d'unité de N ELC au fractionnement (ECV50+ELC70). En fait, cette dernière fertilisation n'a même pas permis de produire significativement plus de rendement vendable que le sol non fertilisé en N (TN0), indiquant que la culture a manqué d'engrais N.

En ce qui a trait à l'irrigation, celle-ci a eu peu d'impact sous les conditions de l'étude et n'a pas permis de produire de rendement supplémentaire, même en 2012, malgré le grand nombre d'irrigations effectuées au cours de cette saison (Tableau 4). En fait, le seul impact significatif est une diminution en 2011 du rendement vendable produit avec l'engrais conventionnel (ECV50+ECV100) de 9 T ha⁻¹ en présence d'irrigation, comparativement aux parcelles non-irriguées. En ce qui a trait à la qualité de la récolte, la compilation des données de densité relative des tubercules démontre qu'il n'y a pas de différence, sauf pour les parcelles TN0 irriguées et non irriguées. En effet les pommes de terre non fertilisées en N ont une densité relative supérieure, tel qu'attendu. De plus, les traitements n'ont eu aucun effet sur l'incidence de la rhizoctonie dont l'indice était faible et similaire pour tous.

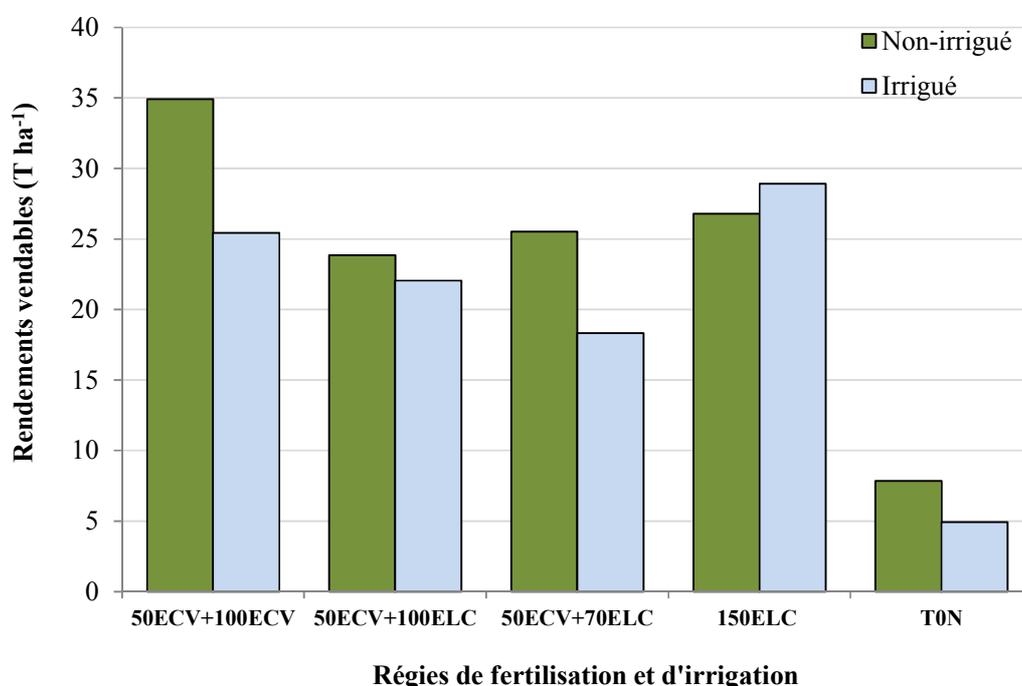


Figure 29. Rendements vendables en tubercules à la récolte selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, saison 2011.

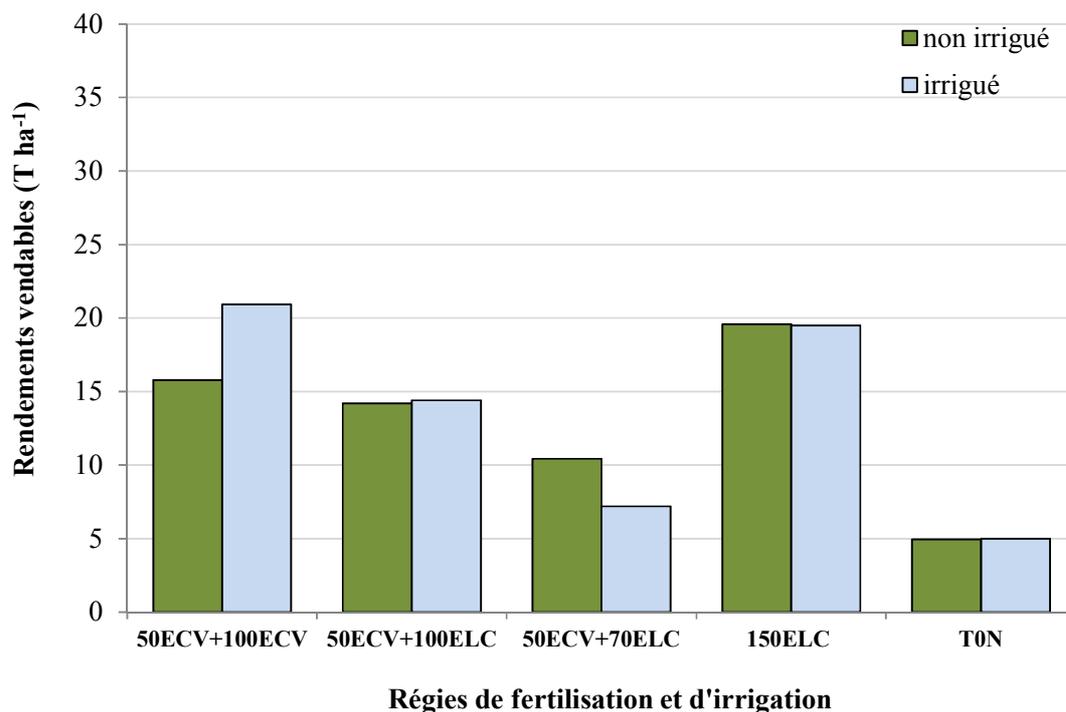


Figure 30. Rendements vendables en tubercules à la récolte selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, saison 2012.

3.6 Efficacité saisonnière d'utilisation du N des engrais

Au cours des deux années d'étude, la régie de fertilisation a fortement influencé le prélèvement par les plants du N des engrais appliqués à la plantation (2011 et 2012, $P < 0.0001$) (Tableau 10 et Tableau 11). Globalement, les mesures révèlent qu'une proportion importante de la dose d'engrais de départ a déjà été prélevée six semaines après la plantation, soit au stade du fractionnement, les deux années. Ainsi, dans les parcelles ayant reçu 50 kg N ha^{-1} à la plantation, un équivalent de 17 à 46 % du N de la dose de plantation se retrouve fixé dans la partie aérienne des plants en 2011, et de 13 à 42 % en 2012. Dans le cas des parcelles ELC150, puisque la proportion de N prélevé par rapport à celle appliquée demande de diviser les prélèvements par la dose entière de 150 kg N ha^{-1} , ce pourcentage est évidemment plus faible (18 à 23 %). Toutefois, les prélèvements y sont les plus élevés, les deux années. En 2011, ceux-ci sont en moyenne 1,5 à 1,6 fois plus élevés dans les parcelles ELC150, comparativement aux autres parcelles fertilisées en N ($P = 0.0023-0.0011$). En 2012, les prélèvements en N y sont 1,6 à 2,5 fois plus élevés ($P = 0.0044-0.0001$) que dans les autres parcelles fertilisées en N. En ce qui a trait à l'irrigation, celle-ci a eu peu d'effet. Tel que pour les rendements, une différence significative n'a été mesurée qu'en 2011 ($P < 0.0422$) et se résume au fait que les prélèvements en N sont moindres dans les parcelles irriguées ($P = 0.0024-0.0005$) où l'engrais conventionnel a été utilisé à la plantation, comparativement à celles fertilisées dès le départ au ELC. En fait, dans les parcelles ELC150, l'irrigation n'a eu aucun impact.

Trois semaines plus tard, au stade floraison, la régie de fertilisation a conservé une très forte influence sur les prélèvements de N les deux années (2011 et 2012, $P < 0.0001$) (Tableau 10 et Tableau 11). À ce stade, le N prélevé se retrouve dans les fanes et les tubercules en développement. De plus, tous les traitements ont désormais reçu la totalité de leur engrais azoté, soit 150 kg N ha^{-1} , sauf pour le traitement ECV50+ELC70 qui a reçu 120 kg N ha^{-1} . Sur cette base, les mesures de CUA révèlent que de 11 à 55 % et de 17 à 53 % du N appliqué au total se retrouve prélevé en 2011 et 2012, respectivement. Les prélèvements se situent ainsi entre 43 et 112 kg N ha^{-1} et 41 et 99 kg N ha^{-1} en 2011 et 2012, respectivement. Ces quantités sont deux à quatre fois plus grandes que celles calculées trois semaines avant, même dans le cas des parcelles témoins. Ceci démontre que les semaines suivant le fractionnement sont une période intense de prélèvement du N. Au niveau plus précis de l'effet des traitements, on constate en 2011 que la régie de fertilisation usuelle (ECV50+ECV100) et celle du ELC150 ont permis des prélèvements en N égaux entre eux et supérieurs (1,4 fois) à ceux des régies mixtes (ECV50+ELC100, ECV50+ELC70) ($P = 0.0259 - 0.0001$). En 2012, les prélèvements en N les plus élevés ont été obtenus avec la fertilisation ELC150 ($P = 0.0284-0.0001$). Les prélèvements y étaient de 1,3 à 1,9 fois plus grands que dans les autres traitements fertilisés. La régie usuelle a tout de même bien performé (ECV50+ECV100), arrivant en 2^e position, avec des prélèvements supérieurs de 1,3 et 1,5 fois à ceux des traitements mixtes ECV50+ELC100 ($P = 0.0566$) et ECV50+ELC70 ($P = 0.0151$), respectivement, qui étaient égaux entre eux. En ce qui a trait à l'irrigation, tel qu'observé au stade précédent, celle-ci a eu peu d'effet. Une différence significative n'a été mesurée qu'en 2011 ($P < 0.0217$) et se résume au fait que les prélèvements en N sont moindres dans les parcelles irriguées ($P = 0.0391 - 0.0025$), sauf pour le traitement ECV50+ELC70 qui présente la même tendance mais qui n'atteint pas le seuil de signification de $P = 0.05$.

À la toute fin de la saison, la mesure des prélèvements permet de calculer le taux d'utilisation apparente (CUA) final du N des engrais puisque les prélèvements par la culture sont terminés (Tableau 10 et Tableau 11). On constate tout d'abord que le sol a fourni entre 30 et 48 kg N ha^{-1} , soit entre 20 et 32 % des besoins de la culture (150 kg N ha^{-1}). En comparaison des besoins azotés, la part de N provenant apparemment des engrais se situe donc entre 68 % et 80 %. En accord avec ce qui a été mesuré pendant la saison, ce pourcentage a fortement été influencé par le type de fertilisation, les deux années (2011 et 2012, $P < 0.0001$) (Tableau 10 et Tableau 11). De plus, pour les deux années, cet impact a été modulé par les apports en eau en cours de saison (interaction [Irrigation x Fertilisation] 2011 à $P < 0.0371$ et 2012 à $P < 0.0570$). Ainsi, en 2011, le taux d'utilisation apparent (CUA) du N des engrais s'est fixé entre 42 et 81 %. En 2012, les CUA ont été plus bas avec des valeurs entre 8 et 52 %. Certaines régies ont donc permis une très bonne utilisation du N des engrais, tandis que d'autres ont eu une faible performance, qui pourrait occasionner une plus grande perte de N dans l'environnement et des pertes de revenus. Ainsi, en 2011, en présence d'irrigation, les régies usuelles (ECV50+ECV100) et ELC150 ont permis d'atteindre les CUA les plus élevés, égaux entre eux, et 1,4 fois plus grands que ceux des traitements mixtes (ECV50+ELC100, ECV50+ELC70) ($P = 0.0219-0.0004$), similaires entre eux. Par contre, en absence d'irrigation, c'est la régie usuelle qui a permis de réaliser le meilleur CUA, dépassant de 1,6, 1,3 et 1,5 fois celui des régies ECV50+ELC100 ($P = 0.0002$), ECV50+ELC70 ($P = 0.0003$) et ELC150 ($P = 0.0008$), respectivement. La saison

2012 présente une conclusion similaire à celle de 2011. En effet, en présence d'irrigation, les régies usuelles (ECV50+ECV100) et ELC150 ont permis d'atteindre les CUA les plus élevés, égaux entre eux, et 1,8 et 5,7 fois plus grands que ceux des traitements mixtes ECV50+ELC100 ($P = 0.0074-0.0011$) et ECV50+ELC70 ($P = 0.00797-0.0001$), respectivement. Toutefois, les CUA des régies mixtes n'étaient pas égaux puisque le traitement ECV50+ELC70 a particulièrement contre performé avec un CUA final de seulement 8 %. En absence d'irrigation, c'est la fertilisation ELC150 qui a permis la plus haute utilisation du N de l'engrais, dépassant de 1,4, 2,5 et 2,2 fois celui des régies ECV50+ECV100 ($P = 0.0224$), ECV50+ELC100 ($P = 0.0001$) et ECV50+ELC70 ($P = 0.0001$), respectivement.

En comparant les divers CUA entre eux, il est possible d'évaluer l'efficacité des diverses régies de fertilisation en fonction de la régie usuelle utilisant l'engrais conventionnel fractionné (ECV50+ECV100) sans irrigation, à laquelle une efficacité de 100 % est attribuée par défaut (Tableau 10 et Tableau 11). On constate donc, en 2011, que lors d'une saison au cours de laquelle les précipitations ont été somme toute bien réparties et présentes, demandant peu d'épisodes d'irrigation, la plus grande efficacité de fertilisation azotée (100 %) a été atteinte avec l'engrais conventionnel 27-0-0 fractionné non irrigué (ECV50+ECV100) ($P < 0.0039$). Viennent ensuite les CE des régies conventionnelle et ELC150 irriguées, exæquo ($P = 0.7349$). Par contre, en 2012, lors d'une saison sèche et chaude, qui a demandé plusieurs épisodes d'irrigation, la plus grande efficacité de fertilisation azotée a été atteinte avec l'engrais à libération contrôlée ELC150 appliqué en totalité à la plantation. Cependant, le CE du ELC150 n'est pas statistiquement différent selon l'irrigation ($P = 0.1335$). Ainsi, l'engrais ELC150 n'a pas fait mieux avec des apports en eau malgré les conditions très sèches de l'été 2012. En fait, en présence d'irrigation, il n'a pas fait mieux que la régie conventionnelle (ELC50+ECV100) ($P = 0.4088$).

Sur le terrain, ces différences de CUA se traduisent en des quantités très différentes de N résiduel non prélevé des engrais. Par exemple, en 2012, l'utilisation de la régie ELC150 non irriguée a laissé 64,5 kg ha⁻¹ de N des engrais non prélevé. En comparaison, faire le choix d'utiliser la régie conventionnelle sans irrigation a laissé 93 kg ha⁻¹ de N des engrais non prélevé.

Tableau 10. CUA et le CE du N en cours de saison et final, selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, été 2011.

Stades et traitements [†]	---- Prélèvements en N (kg N ha ⁻¹) ---		----- CUA (%) ---		----- CE (%) -----	
	I0	I	I0	I	I0	I
Avant fractionnement[‡]						
ECV 50 + ECV 100	21	26	25	35	100 [§]	141
ECV 50 + ELC 100	20	29	23	40	92	164
ECV 50 + ELC 70	18	32	17	46	71	188
ELC150	39	36	20	18	80	73
TN0	9	8				
Floraison (50-75%)						
ECV 50 + ECV 100	112	82	55	35	100	64
ECV 50 + ELC 100	85	68	37	26	67	47
ECV 50 + ELC 70	81	43	43	11	77	21
ELC150	109	86	53	38	96	68
TN0	30	18				
Récolte						
ECV 50 + ECV 100	157	125	81	59	100	73
ECV 50 + ELC 100	112	101	51	43	63	54
ECV 50 + ELC 70	115	87	65	42	81	53
ELC150	119	128	55	61	69	76
TN0	36	30				

[†] Les symboles I, I0 et TN0 identifient les traitements irrigués, non irrigués et le témoin non fertilisé en N, respectivement.

[‡] Le prélèvement en N avant fractionnement est celui des plants seuls, celui à la floraison est la somme du prélèvement des plants et des tubercules de la première récolte périodique et celui de la récolte est la somme du prélèvement des plants au défanage et des tubercules à la récolte finale.

[§] Le traitement ECV50+ECV100 (I0) étant le traitement étalon, un CE de 100 lui est attribué par défaut.

Tableau 11. CUA et le CE du N en cours de saison et final, selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, été 2012.

Stades et traitements [†]	----- Prélèvements en N (kg N ha ⁻¹) -----		--- CUA (%) ---		----- CE (%) -----	
	I0	I	I0	I	I0	I
Avant fractionnement[‡]						
ECV 50 + ECV 100	18	14	20	13	100	68
ECV 50 + ELC 100	19	29	23	42	119	214
ECV 50 + ELC 70	19	18	22	20	114	103
ELC150	37	42	20	23	101	115
TN0	8	6				
Floraison (50-75%)						
ECV 50 + ECV 100	77	70	38	34	100	88
ECV 50 + ELC 100	59	53	26	22	69	57
ECV 50 + ELC 70	60	41	34	17	88	45
ELC150	99	90	53	47	138	122
TN0	20	19				
Récolte						
ECV 50 + ECV 100	105	121	38	49	100	129
ECV 50 + ELC 100	80	85	21	25	56	66
ECV 50 + ELC 70	77	58	24	8	63	22
ELC150	128	113	53	43	141	115
TN0	48	31				

[†] Les symboles I, I0 et TN0 identifient les traitements irrigués, non irrigués et le témoin non fertilisé en N, respectivement.

[‡] Le prélèvement en N avant fractionnement est celui des plants seuls, celui à la floraison est la somme du prélèvement des plants et des tubercules de la première récolte périodique et celui de la récolte est la somme du prélèvement des plants au défanage et des tubercules à la récolte finale.

[†] Le traitement ECV50+ECV100 (I0) étant le traitement étalon, un CE de 100 lui est attribué par défaut.

3.7 Pertes d'azote dans l'environnement

3.7.1 Azote minéral résiduel du sol

Puisque le N des engrais n'a pas été prélevé par la culture avec la même efficacité selon les traitements, des différences au niveau des quantités résiduelles post-récolte étaient attendues. Et effectivement, le sol des parcelles des régions présentant de meilleurs CUA contenait moins de N-NO₃ résiduels (Tableau 12 et Tableau 13). De la même façon, les teneurs en nitrate résiduel sont globalement beaucoup plus élevées en 2012, année où les CUA ont été plus bas, dus en partie aux rendements inférieurs réalisés. Toutefois, ces différences peuvent aussi être modulées par le taux de perte par lessivage en cours de saison. Ainsi, une teneur résiduelle plus faible en nitrate ne signifie pas systématiquement qu'un traitement a perdu moins de N dans l'environnement. Par contre, des teneurs élevées indiquent à coup sûr un risque accru puisque le nitrate résiduel est facilement lessivable et, donc, que de plus fortes teneurs post-récolte signifient plus de risques de pertes dans les eaux de drainage et souterraines. L'analyse du nitrate des eaux de lessivage des lysimètres,

couplée au calcul des CUA, permettra toutefois de statuer sur l'impact environnemental des traitements étudiés dans la section suivante.

En 2011, seul le type de fertilisation a fait une différence ($P = 0.0330$) sur les contenus en nitrate post-récolte de la strate 0-30 cm de sol (Tableau 12). Tous traitements d'irrigation confondus, ces teneurs allaient de 11 à 31 kg N-NO₃ ha⁻¹ selon la fertilisation, ce qui équivaut à 7 à 21 % d'une dose de fertilisation de 150 kg ha⁻¹. En comparaison, le sol non fertilisé en N en contenait 9 kg ha⁻¹. C'est la régie conventionnelle qui a laissé la plus faible teneur en nitrate résiduel, à égalité avec le sol non fertilisé en N. C'est d'ailleurs cette régie de fertilisation qui présentait les meilleurs coefficients d'efficacité (CE) fertilisante (Tableau 10). Les teneurs en nitrate n'y représentaient que 40 %, 35 % et 46 % de celles du sol des parcelles ELC150 ($P = 0,0930$), ECV50+ELC100 ($P = 0,0467$) et ECV50+ELC70 ($P = 0,0239$) qui présentaient entre elles des valeurs équivalentes et significativement plus grandes que celles du sol TN0. En 2012, la strate 0-30 cm de sol contenait de 24 à 124 kg N-NO₃ ha⁻¹ dans les sols fertilisés en N, ce qui équivaut à 16 à 83 % d'une dose de fertilisation de 150 kg ha⁻¹ (Tableau 13). Tant le type de fertilisation ($P = 0,0652$) que l'irrigation ($P = 0,0694$) tendaient à influencer les contenus en N-NO₃ mesurés et ce, sans interaction. Toutefois, l'irrigation n'a fait une différence que pour le traitement ECV50+ELC100 qui a laissé beaucoup plus de nitrate résiduel en absence d'irrigation ($P = 0,0536$). Ainsi, la principale différence réside encore une fois dans le fait que la régie conventionnelle de fertilisation tendait à présenter des teneurs en nitrate inférieures à celles du sol des régies utilisant l'engrais enrobé ECV50+ELC100, ECV50+ELC70 et ELC150, présentant des valeurs équivalentes entre elles.

En ce qui a trait aux charges résiduelles de N-NH₄ (non illustrées), celles-ci étaient faibles comparativement aux valeurs de N-NO₃. Elles se situaient entre 1 et 14 kg N-NH₄ ha⁻¹. Selon l'analyse statistique, l'irrigation n'a eu aucun impact sur cette forme de N les deux années. Par contre, le type de fertilisation a eu un impact (2011, $P = 0.1090$; 2012, $P = 0.0086$), ce qui s'explique par le fait que les engrais ELC sont faits à 100 % de NH₄, comparativement à 50 % dans le 27-0-0. Ainsi, les deux années, le sol des parcelles ayant reçu du ELC contenait plus de N-NH₄, d'autant plus si l'apport s'était fait tardivement. Ainsi, lorsque l'on considère tout le N minéral (N_{min}) (somme du NO₃ et du NH₄) résiduel disponible (Tableau 12 et Tableau 13), il ressort que la régie conventionnelle a laissé des teneurs en N_{min} résiduel moindres que de celles des régies utilisant du ELC. La différence est particulièrement marquée en 2011, année où il y a eu peu d'irrigations, puisque la teneur en N_{min} des parcelles ECV50+ECV100 ne valait que 30 %, en moyenne, de celles des parcelles fertilisées avec du ELC ($P = 0.0412-0.1038$). En 2012, la différence est moins marquée puisque c'est principalement le traitement ECV50+ELC100 qui présente une teneur plus forte en N_{min} que les autres traitements, surtout dans les parcelles non-irriguées.

Enfin, les valeurs de nitrate relâché pendant l'incubation du sol prélevé à l'automne révèlent le potentiel supplémentaire de libération de nitrate de ces sols (i.e. qu'il ne tient pas compte du nitrate mesurable au moment de l'échantillonnage, mais uniquement de celui qui s'ajoute durant l'incubation). Les deux années, seul le type de fertilisation a eu un impact sur ce potentiel (2011, $P = 0.0438$; 2012, $P = 0.0727$) (Tableau 12 et Tableau 13). En 2011, il ressort que la régie ayant apporté la plus grande dose d'engrais ELC au fractionnement (ECV50+ELC100) peut encore libérer significativement plus de nitrate que les autres régies,

soit de 1,7 à 2,7 fois plus ($P = 0.0656-0.0080$). En 2012, le potentiel de libération de nitrate supplémentaire est moindre, mais c'est encore la fertilisation ECV50+ELC100 qui présente le plus de relâchement de nitrate, avec des différences encore plus grandes (2,9 à 4,3 fois) ($P = 0.0372-0.0542$) avec les autres traitements, sauf le traitement ECV50+ELC70 qui présente une valeur moyenne statistiquement similaire. Il semble donc que l'apport de plus grande quantité de ELC en cours de saison ne laisse pas assez de temps aux granules pour libérer leur contenu en N et qu'une application dès la plantation serait plus appropriée. Ces résultats corroborent ceux sur l'efficacité des différentes fertilisations puisque les régies ayant reçu le ELC au fractionnement présentent globalement les moins bons CE (Tableau 10 et Tableau 11). Ce sont aussi ces traitements qui présentent de moins bons rendements. À ce sujet, si l'on recoupe les résultats sur l'efficacité d'utilisation du N des engrais et sur les quantités résiduelles de N minéral, il apparaît que les moins bons rendements produits avec les engrais mixtes sont dus au fait que le ELC ne libère pas le N au rythme nécessaire aux besoins de prélèvements de la culture. Une autre hypothèse, voulant qu'un excès de salinité ait pu jouer un rôle avait aussi été envisagée. Toutefois, cette hypothèse a été écartée puisque des analyses de salinité du sol, effectuées à plusieurs reprises les deux années dans la saison, n'ont montré aucune différence entre les traitements. Ainsi, ce n'est pas l'usage mixte des engrais qui pose problème (ceux-ci n'ont d'ailleurs jamais été mélangés ensemble puisque tout le 27-0-0 a été apporté à la plantation et le ELC au fractionnement) mais le moment d'application du ELC, trop tardif.

Tableau 12. Teneurs en nitrate et en N potentiellement minéralisable du sol à la récolte, selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, saison 2011.

Traitements [†]	À la récolte				Après incubation	
	N-NO ₃ (kg ha ⁻¹)		N _{min} (kg ha ⁻¹) [§]		Δ N-NO ₃ (mg kg ⁻¹) [‡]	
	I0	I	I0	I	I0	I
ECV 50 + ECV 100	9	12	10	13	6	6
ECV 50 + ELC 100	23	33	35	47	22	10
ECV 50 + ELC 70	32	30	45	43	10	9
ELC150	25	23	35	24	8	6
TN0	11	8	13	9	7	6

[†] Les symboles I, I0 et TN0 identifient les traitements irrigués, non irrigués et le témoin non fertilisé en N, respectivement.

[‡] Nitrate (N-NO₃) libérés dans le sol lors des incubations en laboratoire.

[§] Le N_{min} est la somme du N-NH₄ et du N-NO₃.

Tableau 13. Teneurs en nitrate et en N potentiellement minéralisable du sol à la récolte, selon le type d'engrais et la présence ou non d'irrigation, saison 2012.

Traitements [†]	À la récolte				Après incubation	
	N-NO ₃ (kg ha ⁻¹)		N _{min} (kg ha ⁻¹) [§]		Δ N-NO ₃ (mg kg ⁻¹) [‡]	
	I0	I	I0	I	I0	I
ECV 50 + ECV 100	55	24	59	26	2,2	1,5
ECV 50 + ELC 100	124	56	133	62	6,9	3,8
ECV 50 + ELC 70	64	43	69	51	3,0	3,5
ELC150	64	35	66	37	1,0	1,4
TN0	14	14	16	16	1,8	1,5

[†] Les symboles I, I0 et TN0 identifient les traitements irrigués, non irrigués et le témoin non fertilisé en N, respectivement.

[‡] Nitrate (N-NO₃) libérés dans le sol lors des incubations en laboratoire. [§] Le N_{min} est la somme du N-NH₄ et du N-NO₃.

3.7.2 Nitrate lessivé

À chacune des années, la période concentrant le plus de perte N-NO₃ dans les eaux de lessivage débute suivant l'apport supplémentaire de N au fractionnement. Les teneurs restent par la suite plus importantes jusqu'à quelques jours avant la récolte. En 2012, elles remontent aussi suivant la récolte. Les deux années, les teneurs en N-NO₃ dépassent rapidement la norme de 10 mg N-NO₃ L⁻¹ pour l'eau potable. De plus, globalement, les teneurs N-NO₃ ont été plus élevées en 2012, année où les prélèvements en N par la culture ont été moindres, qu'en 2011. En 2011, les teneurs se situaient majoritairement entre 10 et 20 mg N-NO₃ L⁻¹, tandis qu'en 2012, elles se situaient pour de longues périodes entre 20 et 40 mg N-NO₃ L⁻¹ pour certains traitements. Le nombre beaucoup plus élevé d'épisodes d'irrigation en 2012 a probablement joué sur cette différence entre les deux années puisque les traitements de fertilisation comparés étaient identiques. D'ailleurs, un impact significatif de l'irrigation ($P = 0.0091$) sur la teneur en N-NO₃ dans les eaux de lessivage a été mesuré en 2012, en interaction triple avec le type de fertilisation et la date (interaction à $P = 0.0392$), ce qui n'a pas été le cas en 2011, alors que seul le type de fertilisation tendait à avoir un effet, en interaction avec les dates de mesures (interaction à $P = 0.0931$). Les teneurs de N-NO₃ mesurées dans les eaux de lessivage sont donc rapportées, en 2011, en fonction de chacun des types de fertilisation, tous traitements d'irrigation confondus (Figure 31). Par contre, en 2012, étant donné l'interaction [date x irrigation x fertilisation], tous les traitements sont représentés (Figure 32).

Ainsi, en 2011, année avec peu d'épisodes d'irrigation où celle-ci n'a pas eu d'impact significatif ($P = 0.4433$) sur les pertes en N-NO₃, un certain lessivage du nitrate a tout de même été mesuré. Les valeurs de N-NO₃ L⁻¹ sont rapidement passées au-dessus des 10 mg N-NO₃ L⁻¹. Toutefois, cela a été le cas même pour les parcelles non fertilisées en N. En fait, si l'on considère les valeurs mesurées dans les parcelles non fertilisées, allant de 6 à 23 mg N-NO₃ L⁻¹, il y a peu d'écart supplémentaire dans une majorité de parcelles fertilisées. En fait, puisque le type de fertilisation a fait une différence, certains traitements présentent des teneurs très similaires aux valeurs de base du sol. Ainsi, dans les parcelles fertilisées avec la régie usuelle, la valeur médiane de N-NO₃ vaut 1,2 fois celle du sol témoin sans apport d'engrais (TN0). Dans les parcelles fertilisées avec le ELC150, la valeur médiane de N-NO₃ vaut 0,93 fois celle du sol témoin TN0. Les pertes plus importantes se retrouvent donc dans les parcelles fertilisées avec les fertilisations mixtes ECV50+ELC100 et ECV50+ELC70, pour lesquelles les teneurs en N-NO₃ valent parfois jusqu'à 2,25 et 2,85 fois celles du sol non fertilisé en N. Toutefois, les différences notées entre les types de fertilisation ne sont significatives que le 5 juillet, du 19 juillet au 16 août et du 6 au 27 septembre (Figure 31).

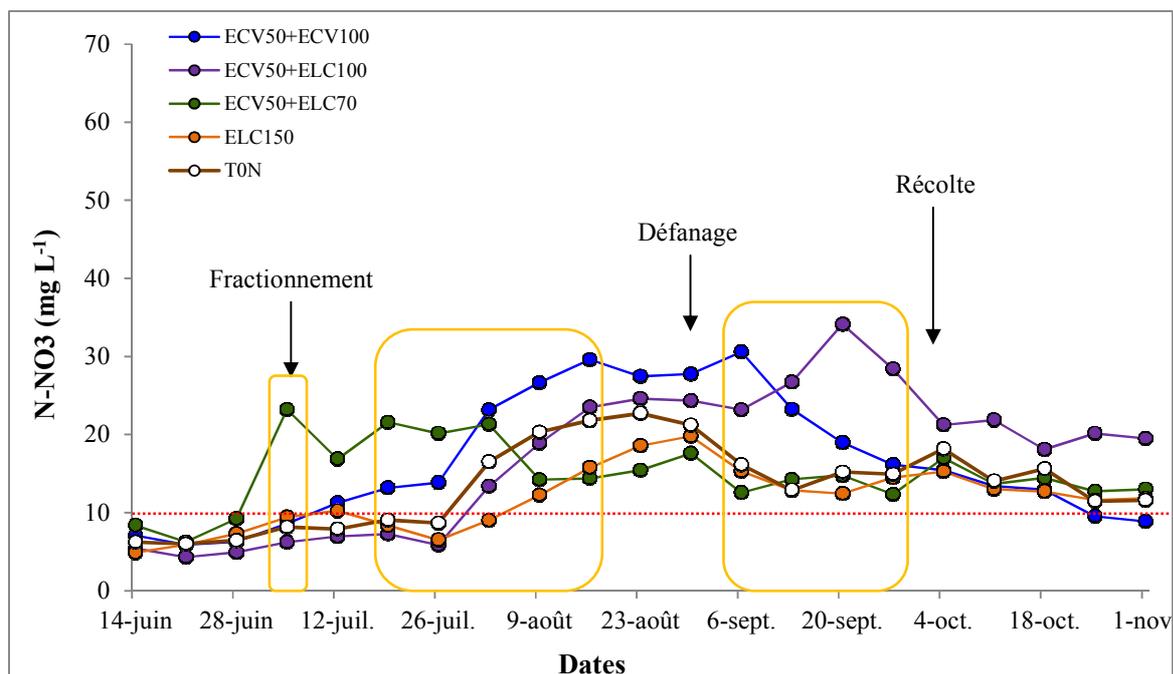


Figure 31. Évolution de la concentration des N-NO₃ dans l'eau de lessivage en cours de saison selon les régies de fertilisation, tous traitements d'irrigation confondus, été 2011.

La ligne rouge indique le seuil limite de 10 mg N-NO₃ L⁻¹ pour l'eau potable. Les aires découpées en jaunes indiquent les périodes où les différences entre les types de fertilisation sont significatives à $P < 0.05$.

En 2012, année où l'irrigation a été beaucoup plus présente (Tableau 4. Nombre d'épisodes d'irrigation effectués par période en 2011 et 2012 dans les traitements irrigués.), il ressort clairement que davantage de nitrate se retrouvent dans les eaux de lessivage d'une majorité de parcelles irriguées. Ainsi, en comparaison des teneurs en N-NO₃ des eaux récupérées dans les parcelles non fertilisées en N, qui présentent des valeurs identiques à celles de 2011 allant de 7,4 à 24,9 mg N-NO₃ L⁻¹, pour une valeur médiane de 15,4 mg N-NO₃ L⁻¹, la teneur médiane mesurée sur la saison dans les parcelles fertilisées non irriguées est similaire, valant 14,4 mg N-NO₃ L⁻¹. Par contre, dans les parcelles fertilisées et irriguées, la valeur médiane atteint 21,7 mg N-NO₃ L⁻¹. On voit d'ailleurs distinctement à la Figure 32 que les courbes les plus élevées en saison sont celles de parcelles irriguées, avec des différences significatives selon l'irrigation du 3 juillet au 4 septembre, ainsi que du 2 au 16 octobre. Toutefois, tel que mentionné précédemment, le type de fertilisation est venu moduler cet impact. En effet, dans les parcelles ELC150, l'irrigation n'a eu aucun effet en saison sur les teneurs mesurées en nitrate dans les eaux lessivées. En fait, en aucun temps, l'irrigation n'a entraîné de valeurs en N-NO₃ plus élevées. C'est d'ailleurs le ELC150 qui a démontré la plus grande efficacité fertilisante en 2012 dans les parcelles non-irriguées et la meilleure, statistiquement égale avec celle de la régie usuelle (ECV50+ECV100), dans les parcelles irriguées. Dans le cas des autres fertilisations, l'irrigation a entraîné des différences significatives de teneurs en N-NO₃ au cours de 10, 8 et 6 semaines pour les régies ECV50+ECV100, ECV50+ELC100 et ECV50+ELC70, respectivement. Dans le cas de la régie usuelle, durant ces semaines, les teneurs en N-NO₃ étaient de 2,2 à 4,3 fois plus

élevées dans les parcelles irriguées. Dans les parcelles ECV50+ELC100, les teneurs en N-NO₃ étaient de 1,7 à 4,1 fois plus élevées dans les parcelles irriguées. Enfin, dans les parcelles ECV50+ELC70, les teneurs en N-NO₃ étaient de 1,9 à 3,1 fois plus élevées dans les parcelles irriguées.

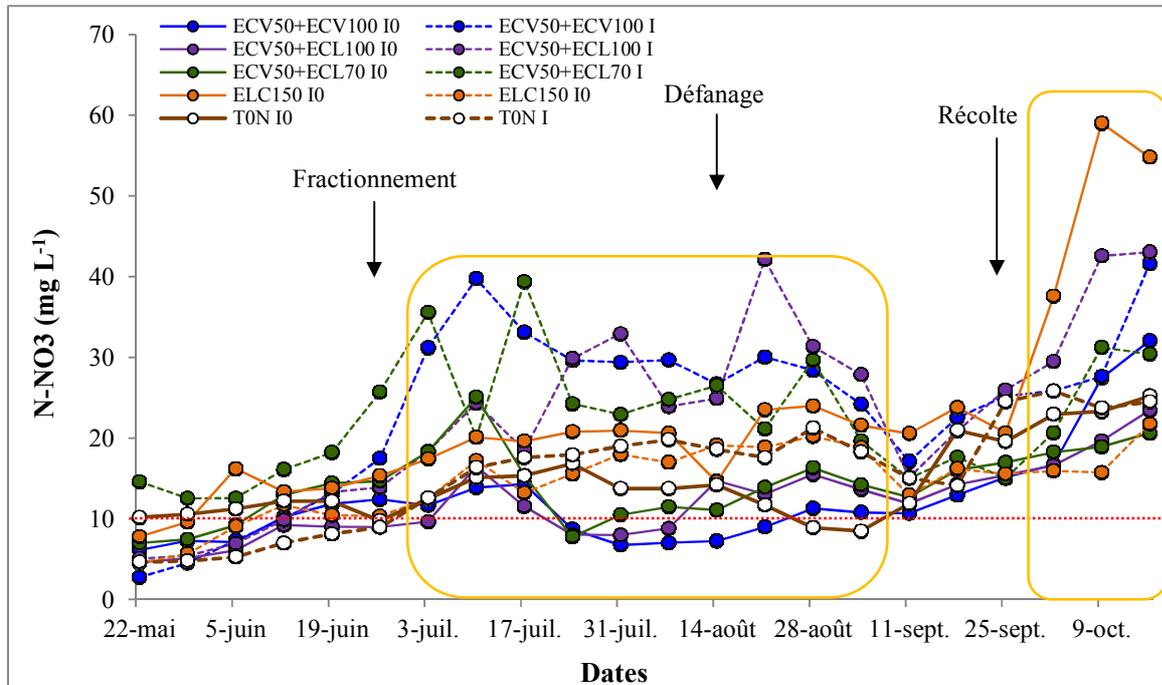


Figure 32. Évolution de la concentration des N-NO₃ dans l'eau de lessivage en cours de saison selon les régimes de fertilisation et d'irrigation, été 2012.

La ligne rouge indique le seuil limite de 10 mg N-NO₃ L⁻¹ pour l'eau potable. Les aires découpées en jaunes indiquent les périodes où les différences entre les traitements sont significatives.

3.8 Analyse économique

La première partie de l'analyse économique repose sur le potentiel d'améliorer la rentabilité du système cultural par l'adoption de l'un ou l'autre des traitements de fertilisation et d'ajouter ou non des apports en eau par l'irrigation. Le contexte utilisé pour déterminer cette rentabilité repose sur des comparaisons entre les combinaisons possibles de traitements (Fertilisation x Irrigation) et le témoin sans apport de N et non irrigué (TN0). De plus, il est important de considérer le fait suivant, à savoir que les scénarios avec irrigation s'appliquent à des producteurs qui ont un système d'irrigation et ceux sans irrigation s'appliquent à des producteurs qui n'ont pas de système d'irrigation. Enfin, le traitement ECV50+ECV100 non irrigué, qui se veut le traitement de l'étude le plus représentatif de ce qui se retrouve dans le milieu de la production de la pomme de terre au Québec, est utilisé comme le traitement comparatif. Conséquemment, une valeur de 100 % lui est accordée (Tableau 14). Ainsi, un traitement ayant une valeur supérieure à 100 %, indique que celui-ci a mieux performé que le traitement représentatif (ECV50+ECV100 non irrigué).

En 2011, année avec peu de besoin d'irrigation, la régie conventionnelle ECV50+ECV100 I₀ s'est avérée la plus profitable de celles à l'étude, car aucun autre ne présente une valeur plus élevée. Toutefois, la régie ELC150, irriguée ou non, occupe le 2^e rang avec des valeurs respectives de 74 et 69 %. Ces pourcentages signifient que la rentabilité atteinte avec ce dernier est équivalente à 74 et 69 % de celle atteinte avec le ECV50+ECV100. En 2012, la régie conventionnelle ECV50+ECV100 I₀ obtient la 4^e place, derrière le ELC150 non irrigué (142 %), le ECV50+ECV100 irrigué (141 %) et le ELC150 irrigué (128 %). L'irrigation a donc été davantage profitable en 2012, avec deux traitements parmi les cinq meilleurs. Ainsi, les deux années, les régies ECV50+ECV100 et ELC150 se démarquent positivement des autres.

Comme la possibilité d'irriguer ou non est souvent une situation prédéterminée, i.e. que le producteur a ou n'a pas de système d'irrigation, l'exercice de hiérarchisation des traitements a aussi été réalisé à l'intérieur de chacune des deux options (Tableau 15). Ainsi, pour un producteur qui ne possède pas de système d'irrigation, le meilleur scénario demeure le ECV50+ECV100 (100 %) en 2011 et la 2^e place revient au ELC150 (69 %). En 2012, toujours pour le même producteur, les options les plus rentables sont respectivement le ELC150 (142 %) et le ECV50+ECV100 (100 %). Au terme de ces deux saisons, où les précipitations mesurées ont été très contrastées, le ECV50+ECV100 et le ELC150 semblent donc des choix intéressants où le risque est minime vis-à-vis les aléas climatiques. En ce qui a trait au producteur qui possède un système d'irrigation, les deux mêmes traitements s'avèrent intéressants. En 2011, le ELC150 arrive en 1^{re} place, alors que ce dernier cède sa place au ECV50+ECV100 en 2012.

En résumé, l'importance de bien choisir et gérer ses régies de fertilisation et d'irrigation ressort fortement puisque les choix qui sont faits font varier fortement la marge bénéficiaire. Globalement, les traitements mixtes apportant l'engrais ELC trop tardivement ont montré les moins bonnes performances les deux années. À l'opposé, le traitement usuel ECV50+ECV100 et le ELC150 ont été les meilleurs les deux années. Le scénario représentatif du contexte actuel de la production de la pomme de terre au Québec (ECV50+ECV100 non irrigué) est une option économiquement rentable pour un producteur qui n'irrigue pas lors de saison pluvieuse tout en étant intéressante lors d'une saison plus sèche. Alors que le ELC150, performera bien en saison pluvieuse et exprimera son plein potentiel lors d'une saison plus chaude et davantage sèche comme celle de 2012. Pour le producteur qui a recours à l'irrigation, les deux mêmes traitements s'avèrent tout aussi intéressants, mais dans des contextes météorologiques différents. En effet, alors que le ELC150 sera plus efficace que le ECV50+ECV100 lors de saison davantage pluvieuse, possiblement du fait qu'il limite les pertes de nitrate par lessivage, le ECV50+ECV100 sera lui plus performant avec une régie raisonnée d'irrigation lors d'une saison plus sèche comme celle de 2012. Dans le contexte où les producteurs de pommes de terre ne peuvent pas savoir quel temps il fera dans la saison au moment de choisir l'engrais à utiliser, la polyvalence du ELC devient non seulement avantageuse en termes économiques, mais aussi en termes environnementaux puisqu'il permet d'éviter le passage de machinerie requis au renchauffage, contribuant ainsi à la réduire le nombre total de passages qui causent la compaction des sols et également parce que le ELC présente d'excellents CUA du N des engrais et peu de lessivage de nitrate.

Tableau 14. Rentabilité des traitements lorsque ceux-ci sont tous comparés les uns aux autres pour les saisons 2011 et 2012.

Traitements	2011		2012	
	%	Rang	%	Rang
<i>Non irrigués</i>				
ECV50+ECV100	100	1	100	4
ECV50+ELC100	58	6	85	5
ECV50+ELC70	65	4	47	7
ELC150	69	3	142	1
TN0	0	9	0	10
<i>Irrigués</i>				
ECV50+ECV100	60	5	141	2
ECV50+ELC100	47	7	77	6
ECV50+ELC70	34	8	4	9
ELC150	74	2	128	3
TN0	-15	10	9	8

Tableau 15. Rentabilité des traitements lorsque ceux-ci sont comparés entre eux selon qu'une entreprise possède ou non un système d'irrigation pour les saisons 2011 et 2012.

Traitements	2011		2012	
	%	Rang	%	Rang
<i>Non irrigués</i>				
ECV50+ECV100	100	1	100	2
ECV50+ELC100	58	4	85	3
ECV50+ELC70	65	3	47	4
ELC150	69	2	142	1
TN0	0	5	0	5
<i>Irrigués</i>				
ECV50+ECV100	100	2	100	1
ECV50+ELC100	79	3	55	3
ECV50+ELC70	56	4	3	5
ELC150	124	1	91	2
TN0	-25	5	6	4

4. CONCLUSION

En conclusion, cette étude révèle que le type de fertilisation azotée employée a un impact important sur la croissance et la nutrition des plants, le rendement en tubercules, l'utilisation du N des engrais et sa perte par lessivage. De son côté, l'irrigation a eu un impact moindre, qui s'est surtout limité à moduler l'effet du type de fertilisant et non à hausser la nutrition ou le rendement. En cours de saison, l'effet positif de la fertilisation azotée sur le développement des plants a passé par une meilleure nutrition azotée. Par ailleurs, au stade floraison, de 26 à 51 % du poids final total en tubercules était déjà produit. Il y avait par ailleurs à ce stade une relation relativement forte entre la masse sèche unitaire des plants et leur production en tubercules. La masse sèche s'est aussi révélée fortement corrélée au CUA du N des engrais au même stade et même relativement bien reliée aux CUA finaux. Les mesures de CUA à ce stade révélaient d'ailleurs que de 11 à 55 % du N apporté par les engrais se retrouvait déjà prélevé par la culture. De plus, les quantités de N prélevées à ce moment étaient de deux à quatre fois plus grandes que celles calculées trois semaines plus tôt, juste avant le fractionnement. Ceci démontre que les semaines suivant le fractionnement sont une période intense de prélèvement du N. À la toute fin de la saison, la part de N provenant apparemment des engrais se situait entre 8 et 81 %, la balance ayant été fournie par le sol. La partie non prélevée du N des engrais se situait donc entre 29 et 110 kg N ha⁻¹. Certaines régions ont donc permis une très bonne utilisation du N des engrais, tandis que d'autres ont eu une très faible performance qui pourrait occasionner une plus grande perte de N dans l'environnement et des pertes de revenus. De façon plus détaillée, lors d'une saison au cours de laquelle les précipitations ont été somme toute bien réparties et présentes, demandant très peu d'épisodes d'irrigation (2011), la plus grande efficacité de fertilisation azotée a été atteinte avec la région conventionnelle (ECV50+ECV100) non irriguée. Venaient ensuite les régions conventionnelles et ELC150 irriguées, exæquo. Par contre, en 2012, lors d'une saison sèche et chaude, qui a demandé plusieurs épisodes d'irrigation, la plus grande efficacité a été atteinte avec le ELC150, qui n'a d'ailleurs pas fait mieux avec des apports en eau malgré les conditions très sèches. Les moins bonnes efficacités ont été obtenues les deux années avec les fertilisations apportant le ELC au fractionnement. Le potentiel de libération de nitrate du sol à l'automne démontrait d'ailleurs que la région ayant apporté la plus grande dose d'engrais ELC au fractionnement (ECV50+ELC100) pouvait encore libérer de 1,7 à 4,3 fois plus de nitrate que le sol des autres régions. Il semble donc que l'apport de ELC en cours de saison ne laisse pas assez de temps aux granules pour libérer leur contenu en N et qu'une application dès la plantation serait plus appropriée. En ce qui a trait au lessivage, les teneurs N-NO₃ des eaux lessivées étaient deux fois plus élevées en 2012, année où le nombre d'épisodes d'irrigation a été élevé et les prélèvements en N par la culture moindres qu'en 2011. D'ailleurs, un impact significatif de l'irrigation sur la teneur en N-NO₃ dans les eaux de lessivage a été mesuré en 2012, en interaction avec le type de fertilisation, ce qui n'a pas été le cas en 2011, alors que seul le type de fertilisation tendait à avoir un effet. Ainsi, en 2011, les teneurs en N-NO₃ des eaux de lessivage des parcelles fertilisées avec la fertilisation usuelle ECV50+ECV100 et le ELC150 présentaient une valeur médiane similaire à celle du sol non fertilisé en N. Les pertes plus importantes se retrouvaient donc dans les parcelles ayant reçu du ELC au fractionnement. En 2012, pour tous les traitements, beaucoup plus de nitrate se retrouvait dans les eaux de lessivage des parcelles irriguées, exception faite des parcelles ELC150 où l'irrigation n'a eu aucun effet. Au final, au niveau

des rendements, l'apport de ELC au fractionnement a fortement désavantagé la production de tubercules. Encore une fois, il semble bien que l'engrais a trop tardé à libérer des quantités suffisantes de N pour soutenir le développement des plants et la production de tubercules. En comparaison, l'apport de toute la dose de N sous forme de ELC à la plantation a permis d'excellents rendements, parmi les meilleurs, les deux années. La fertilisation conventionnelle (ECV50+ECV100 I₀) a également produit certains des meilleurs rendements. Enfin, selon l'analyse économique, pour un producteur qui ne possède pas de système d'irrigation, la régie ECV50+ECV100 non irriguée, représentative du contexte actuel de production de la pomme de terre au Québec, constitue un bon choix puisque lors d'une saison où les précipitations sont adéquates, cette régie produit le meilleur gain sur la marge bénéficiaire, suivi du ELC150 et que lors d'une saison sèche, elle se retrouve tout de même en 2^e place, derrière le ELC150. Pour le producteur qui a recourt à l'irrigation, les deux mêmes traitements s'avèrent tout aussi intéressants, mais dans des contextes météorologiques différents. En effet, alors que le ELC150 sera plus efficace que le ECV50+ECV100 lors de saison davantage pluvieuse, le ECV50+ECV100 sera lui plus performant avec une régie raisonnée d'irrigation lors d'une saison plus sèche comme celle de 2012. Les traitements mixtes apportant l'engrais ELC trop tardivement ont pour leur part montré des performances grandement réduites les deux années. Ceci fait ressortir l'importance de bien choisir et gérer ses régies de fertilisation et d'irrigation puisque les choix qui sont faits font fortement varier la marge bénéficiaire. Dans le contexte où les producteurs de pommes de terre ne peuvent pas savoir quel temps il fera dans la saison au moment de choisir l'engrais à utiliser, la polyvalence du ELC mis en totalité à la plantation devient non seulement avantageuse en termes économiques, mais aussi en termes environnementaux puisqu'il réduit le passage de machinerie contribuant à la compaction des sols et qu'il présente un excellent CUA du N des engrais et peu de lessivage de nitrate.

5. BIBLIOGRAPHIE

ACIA. 2013. Inspection de la qualité. Manuels d'inspection des légumes frais. Pommes de terre. Calibre. Exigences – pomme de terre de type long. Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA). [en ligne]
<http://www.inspection.gc.ca/fra/1297964599443/1297965645317> (consultée en février 2013).

BOIVIN, C. et C. LANDRY. 2008. Cibler le stade phénologique optimal pour amorcer l'irrigation en lien avec le gain en pommes de terre et la perte des nitrates. Rapport CDAQ, projet #6163, 51 pages.

BOIVIN, C., C. LANDRY et J. CARON. 2008. Étude d'acquisition de connaissances sur la détermination de l'existence de patrons éventuels d'assèchement ou d'humidité dans un sol agricole en relation avec le rendement en pommes de terre et la perte des nitrates. Rapport final, juin 2008. Programme PAECQ /5218, AAC, CDAQ, 47 pages.

BOIVIN, C. et C. LANDRY. 2011. Impact du pilotage raisonné de l'irrigation sur l'efficacité fertilisante azotée et le rendement en pommes de terre. Rapport final CDAQ, projet #6374, 71 pages.

CASTLE E.N., M.H. BECKER et A.G. NELSON. 1987. Farm Business Management – The Decision-Making Process. Macmillan Publishing Company. 413 pages.

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

CRAAQ. 2010a. Guide de référence en fertilisation 2^{ème} édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 473 pages.

CRAAQ. 2010b. Pomme de terre de table – Budget, variété tardive. AGDEX 258/821h (Avril 2010). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 10 pages.

CRAAQ. 2012a. Machinerie - Coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés. AGDEX 740/825 (Mars 2012). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 25 pages.

CRAAQ. 2012b. Fertilisants et amendements – Prix. AGDEX 540/855 (Juin 2012). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 1 page.

FOX, R.H. et W.P. PIEKIELEK. 1978. A rapid method for estimating the nitrogen supplying capability of a soil. Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 42. Pages 743-747.

FPPQ. 2013. Fédération des producteurs de porcs du Québec. [en ligne] <http://www.fpptq.qc.ca/modele.htm> (consulté le 20 février 2013).

GEE, G.W. et J.W. BAUDER. 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.

GIROUX. 2003. Contamination de l'eau souterraine par les pesticides et les nitrates dans les régions de culture de pomme de terre. Campagnes d'échantillonnages 1999-2000-2001. MDDEP Envirodoc ENV/2003/0233. 23 pages.

GIROUX, M., A. N'DAYEGAMIYE et R. ROYER. 2007. Effets des apports d'automne et de printemps de fumier et de boues mixtes de papetières sur le rendement, la qualité de la pomme de terre et de l'efficacité de l'azote. Agrosolutions 18 (1) : pages 25-34.

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

ISQ. 2013. Superficie, production, ventes hors secteur et recettes monétaires de la pomme de terre, par région administrative, Québec. Institut de la statistique du Québec (ISQ). [en ligne]

http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/flr_bioal/culture/culture/am221012.htm
(consultée en février 2013).

JUMA N.G. et E.A. PAUL. 1984. Mineralisable soil nitrogen: Amounts and Extractability Ratios, *Soil Sci. Am. J.* Vol. 48. Pages 70-80.

LITTELL, R.C., G.A. MILLIKEN, W.W. STROUP, R.D. WOLFINGER et O. SCHABENGERGER. 2006. SAS. System for Mixed Models, second edition. Cary, NC : SAS Institute inc.

MAAARO. 2004. Pratiques de gestion optimales – Gestion de l’irrigation. Ministère de l’Agriculture, de l’Alimentation et des Affaires rurales de l’Ontario (MAAARO). 116 pages.

TOPP, G.C., Y.T. GALGANOV, B.C. BALL et M.R. CARTER. 1993. Soil water desorption curves. *Dans* M.R. Carter (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida. Pages. 569-580.

TRAN, T.S. et R.R. SIMARD. 1993. Mehlich III-extractable elements. Chapitre 6. *Dans* M.R. Carter (ed.) *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, Florida. Pages 43-49.

TRAN, T.S., M. GIROUX et A. N'DAYEGAMIYE. 1992. Utilisation rationnelle des fumures azotées minérales : aspects agronomiques et environnementaux. *Agrosol* 5 (2) : Pages 18-25.

WHITNEY, D.A. 2011. Soil salinity. *Dans* Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region. Chapter 13. North Central Regional Research Publication No. 221 (Revised). Pages 59-61.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à souligner la précieuse collaboration au projet des ouvriers de la ferme expérimentale de Deschambault de même que celle des étudiants d’été Héloïse Bastien, Bruno Lavallée, Jean-François Plourde, Alain Marcoux, Julien Vachon, Nicolas Watters et David Bilodeau. Notre appréciation s’étend également au Club agroenvironnemental de la Rive Nord (CARN) pour leur soutien. Enfin, les auteurs tiennent à 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).