



Impact du pilotage raisonné de l'irrigation sur l'efficacité fertilisante azotée et le rendement en pomme de terre

Projet # 6374



Rapport final

Mai 2009 à mai 2011

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

Avec la collaboration de
Paul Deschênes, agr., M.Sc. – IRDA
Julie Mainguy, agr. – IRDA
Danièle Pagé, t.a. – IRDA
Stéphane Nadon, t.a – IRDA
Daniel Bergeron, agr., M.Sc. – MAPAQ
Serge Bouchard, t.a. – MAPAQ

Décembre 2011

Équipe de réalisation

IRDA

Christine Landry	Chercheure
Carl Boivin	Chercheur
Paul Deschênes	Professionnel de recherche
Julie Mainguy	Attachée de recherche
Danièle Pagé	Technicienne agricole
Stéphane Nadon	Technicien agricole
Michèle Grenier	Statisticienne
Aline Germain	Technicienne agricole
Rémi Carrier	Technicien agricole
Jocelyn Boudrias	Technicien agricole
Mathieu Bernier-Therrien	Technicien agricole

Pierre-Yves Pettigrew	Étudiant d'été en génie agrœnvironnemental
Étienne Rousseau	Étudiant d'été en génie agrœnvironnemental
Jessica Dagenais	Étudiante d'été en biologie
Marc-Antoine Robert	Étudiant d'été en agronomie
Rosemary Allen	Étudiante d'été en agronomie
Noelie Hebert Tardif	Étudiante d'été en biologie

MAPAQ DRCN

Daniel Bergeron	Conseiller en horticulture
-----------------	----------------------------

MAPAQ DRBSL

Serge Bouchard	Conseiller en production de pomme de terre
----------------	--

Table des matières

1	SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET	8
2	DESCRIPTION DU PROJET.....	9
2.1	Introduction.....	9
2.2	Objectif général.....	10
2.3	Objectifs spécifiques.....	10
3	MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	11
3.1	Mise en place de l'expérience.....	11
3.2	Traitements	14
3.3	Dispositif expérimental.....	14
3.4	Collecte des données.....	16
3.4.1	Analyses physiques et chimiques de sol.....	16
3.4.2	Développement et nutrition de la pomme de terre.....	16
3.4.2.1	Masse des plants, prélèvement en N et coefficient d'utilisation apparente du N	16
3.4.2.2	Analyse du N _{tot} de la 4 ^e feuille mature.....	17
3.4.2.3	Récolte des tubercules.....	17
3.4.2.4	Récoltes périodiques	18
3.4.2.5	Densité racinaire	18
4	RÉSULTATS ET ANALYSE	21
4.1	Impact d'une gestion tensiométrique de l'irrigation basée sur les caractéristiques physiques du sol	21
4.1.1	Apports en eau durant la saison	21
4.1.2	Développement et nutrition des plants en saison.....	22
4.1.2.1	Récoltes périodiques	27
4.1.2.2	Les rendements commercialisables.....	35
4.1.2.3	Densité racinaire	37
4.1.3	Utilisation de l'azote par la culture et part non utilisée des engrais azotés	44
4.1.4	Gains économiques par comparaison des rendements commercialisables	47
4.1.4.1	Contexte et méthode	47
4.1.4.2	Résultats.....	49
4.1.5	Teneur en nitrates des eaux de lessivage et résiduelle dans les sols à la récolte	51
4.2	Mise à l'essai de la méthode de pilotage de l'irrigation française IRRINOV [®] afin d'expérimenter son potentiel d'utilisation au Québec.....	55
4.3	Mise à l'essai de la méthode du bilan hydrique pour la saison de culture afin de vérifier son utilité comme méthode de pilotage de l'irrigation.....	60
5	DIFFUSION DES RÉSULTATS	65
6	CONCLUSIONS ET SUITE DU PROJET	67
7	BIBLIOGRAPHIE.....	68

Liste des figures

Figure 1. Lysimètre à succion et tensiomètre modèle T-80 en arrière-plan.	12
Figure 2. Système d'irrigation par aspersion au site expérimental de Deschambault, 2010.	13
Figure 3. Suivi de la profondeur d'enracinement en cours de saison.	14
Figure 4. Dispositif expérimental au site de Deschambault en 2009 et 2010.	15
Figure 5. Trancheuse utilisée pour prélever le sol servant à mesurer la distribution et la densité racinaire.	19
Figure 6. Enfoncement de la trancheuse dans la butte de sol.	19
Figure 7. Schéma de la « trancheuse » de sol avec les 16 zones considérées.	20
Figure 8. Teneur en N_{tot} dans la 4 ^e feuille mature des plants de pommes de terre 'Norland' en 2009 (A) et 2010 (B) au stade pleine floraison. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.	23
Figure 9. Teneur en N_{tot} dans la 4 ^e feuille mature des plants de pommes de terre 'Russet B.' en 2009 (A) et 2010 (B) au stade pleine floraison. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.	23
Figure 10. Contenu en nitrates disponibles dans la couche utile de sol (0-20 cm) dans les parcelles de 'Norland' en 2009 (A) et 2010 (B) au stade pleine floraison. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.	24
Figure 11. Contenu en nitrates disponibles dans la couche utile de sol (0-20 cm) dans les parcelles de 'Russet B.' en 2009 (A) et 2010 (B) au stade pleine floraison. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.	24
Figure 12. Masse sèche des plants de pommes de terre 'Norland' en 2009 (A) et 2010 (B) au stade pleine floraison. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.	25
Figure 13. Masse sèche des plants de pommes de terre 'Russet B.' en 2009 (A) et 2010 (B) au stade pleine floraison. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.	25
Figure 14. Zone de jaunissement apparent (cercle jaune) des plants d'une parcelle $I_{65\%}\text{-N}$ (E) de 'Russet B.' au 28 juillet 2010.	26
Figure 15. Parcelle non irriguée du traitement $I_0\text{-N}$ (C) de 'Russet B.' au 28 juillet 2010 où aucune zone de jaunissement des plants n'est visible.	26
Figure 16. Récoltes périodiques effectuées en 2009 pour les cultivars Russet B. (A) et Norland (C), ainsi qu'en 2010 pour les cultivars Russet B. (B) et Norland (D).	28
Figure 17. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids et le traitement en 2009 ('Russet B.').	31
Figure 18. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids et le traitement en 2009 ('Norland').	32
Figure 19. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids et le traitement en 2010 ('Russet B.').	33
Figure 20. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids et le traitement en 2010 ('Norland').	34
Figure 21. Rendements commercialisables en pommes de terre pour la 'Norland' en 2009 (A) et 2010 (B) à la récolte. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement	

différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire. La ligne jaune indique la moyenne provinciale.....	36
Figure 22. Rendements commercialisables en pommes de terre pour la 'Russet B.' en 2009 (A) et 2010 (B) à la récolte. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire. La ligne jaune indique la moyenne provinciale.....	36
Figure 23. Distribution de la densité racinaire moyenne (cm de racine par cm^3 de sol) selon la zone (1 à 12) pour le cultivar Russet B. (tous traitements confondus), août 2010.....	38
Figure 24. Distribution de la densité racinaire moyenne (cm de racine par cm^3 de sol) selon la zone (1 à 12) pour le cultivar Norland (tous traitements confondus), août 2010.....	38
Figure 25. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm^3 de sol) de la zone « inférieure » pour le cultivar Russet B. ($P \leq 0,1$).....	39
Figure 26. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm^3 de sol) de la zone « supérieure » pour le cultivar Russet B. ($P \leq 0,1$).....	39
Figure 27. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm^3 de sol) de la zone « Est » pour le cultivar Russet B. ($P \leq 0,1$).....	40
Figure 28. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm^3 de sol) des zones « Ouest » pour le cultivar Russet B. ($P \leq 0,1$).....	40
Figure 29. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm^3 de sol) de la zone « inférieure » pour le cultivar Norland ($P \leq 0,1$).....	41
Figure 30. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm^3 de sol) de la zone « supérieure » pour le cultivar Norland (n.s.).....	41
Figure 31. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm^3 de sol) des zones « Est » pour le cultivar Norland ($P \leq 0,1$).....	42
Figure 32. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm^3 de sol) des zones « Ouest » pour le cultivar Norland ($P \leq 0,1$).....	42
Figure 33. Fonction de production et rendements marginaux décroissants.....	47
Figure 34. Profit à la marge de l'irrigation de la pomme de terre.....	49
Figure 35. Concentrations hebdomadaires en N-NO ₃ dans l'eau des lysimètres durant la saison 2009 dans les parcelles du cultivar Norland.....	52
Figure 36. Concentrations hebdomadaires en N-NO ₃ dans l'eau des lysimètres durant la saison 2010 dans les parcelles du cultivar Norland.....	52
Figure 37. Concentrations hebdomadaires en N-NO ₃ dans l'eau des lysimètres durant la saison 2009 dans les parcelles du cultivar Russet B.....	53
Figure 38. Concentrations hebdomadaires en N-NO ₃ dans l'eau des lysimètres durant la saison 2010 dans les parcelles du cultivar Russet B.....	53
Figure 39. Teneur en nitrates résiduels dans la couche de sol (0-20 cm) dans les parcelles de 'Norland' en 2009 (A) et 2010 (B) à la récolte. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.	54
Figure 40. Teneur en nitrates résiduels dans la couche de sol (0-20 cm) dans les parcelles de 'Russet B.' en 2009 (A) et 2010 (B) à la récolte. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.	54
Figure 41. Tensions à 30 et 60 cm, épisodes d'irrigation et précipitations de la parcelle 21 (Russet B.) pour la saison 2010.....	58
Figure 42. Tensions à 30 et 60 cm, épisodes d'irrigation et précipitations de la parcelle 13 (Norland) pour la saison 2010.....	59

Figure 43. Évolution des tensions présentées dans le document IRRINOV®. Source : Arvalis, 2006.	59
Figure 44. Teneur en eau et hauteur d'eau en fonction de la tension du sol.	61
Figure 45. Gestion tensiométrique des sous-parcelles 1, 9, 33 et 38 du 12 au 22 juin 2010.	62
Figure 46. Plantation.	70
Figure 47. Parcelles et station météo.	70
Figure 48. Système d'irrigation, lysimètre et tensiomètre.	71
Figure 49. Irrigation et pluviomètres (20) pour mesurer l'uniformité d'application.	71

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractérisation du sol lors des deux années de l'étude au site de Deschambault.....	11
Tableau 2. Dates de plantation, de récolte et d'apports en fertilisants pour les cultivars Norland et Russet B. au cours des deux années de l'étude.....	11
Tableau 3. Nombre effectué d'épisodes d'irrigation en 2009 selon le traitement et la période. .	21
Tableau 4. Nombre effectué d'épisodes d'irrigation en 2010 selon le traitement et la période. .	21
Tableau 5. Mesure de la qualité des tubercules pour 'Norland' et 'Russet B.' en 2009 et 2010.	37
Tableau 6. Prélèvements et coefficient partiel d'utilisation apparente de l'azote par les plants de pommes de terre 'Norland' au stade pleine floraison en 2009 et 2010.	45
Tableau 7. Prélèvements totaux et coefficient d'utilisation apparente final de l'azote par les plants de pommes de terre 'Norland' à la récolte en 2009 et 2010.	46
Tableau 8. Prélèvements et coefficient d'utilisation apparente partiel de l'azote par les plants de pommes de terre 'Russet B. au stade pleine floraison en 2009 et 2010.	46
Tableau 9. Prélèvements totaux et coefficient d'utilisation apparente final de l'azote par les plants de pommes de terre 'Russet B.' à la récolte en 2009 et 2010.	47
Tableau 10. Valeurs météorologiques.	57
Tableau 11. Nombre d'épisodes d'irrigation du 23 juillet au 10 septembre 2009.	63
Tableau 12. Nombre d'épisodes d'irrigation pour la saison 2010.	64

Annexe

ANNEXE 1. Photos	70
------------------------	----

1 SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET

Généralement, la pomme de terre (PdT) est produite en sols sableux ayant une faible capacité de rétention en eau. Cette production est donc réceptive à l'irrigation, mais le peu d'information au sujet de sa gestion et de sa faisabilité économique en freine l'expansion. Par ailleurs, des apports élevés en azote (N) sont requis puisque la PdT présente un faible coefficient d'utilisation apparente (CUA) du N des engrais et que ces sols en fournissent peu. Ceci renforce le besoin de raisonner la gestion de l'irrigation afin de ne pas hausser le lessivage du N.

Ce projet évaluait donc l'impact de diverses consignes d'irrigation basées sur la réserve en eau utile du sol (RU) sur le développement de la PdT et le devenir du N. Le projet a été réalisé 2009-2010, en collaboration avec le MAPAQ, à la station de recherche de Deschambault de l'IRDA sur un loam sableux avec les cultivars 'Norland' et 'Russet Burbank'. La saison 2010 a compté 87 % plus d'épisodes que celle de 2009 et les deux années, la 'Russet B.' a reçu 60 % des épisodes d'irrigation.

Les résultats démontrent que le choix d'une consigne peut avoir un impact tôt en saison lors d'étés plus secs. Ainsi, en 2010, à la floraison, les plants fertilisés en N les plus irrigués ($I_{65\%-N}$) des deux cultivars avaient une teneur en N_{tot} foliaire inférieure à celles des plants non irrigués (I_0-N) et irrigués à 50 % de la RU ($I_{50\%-N}$). Étant donné que le sol des parcelles $I_{65\%-N}$ contenait moins de $N\text{-NO}_3$, il semble que leur lessivage ait été haussé, comme le suggère la teneur plus élevée en $N\text{-NO}_3$ des eaux lessivées de ces parcelles. De plus, le CUA final du N de l'engrais de ce traitement inférieur, avec 30 et 22 kg de N ha^{-1} de prélevés en moins pour la 'Norland' et la 'Russet B.', respectivement. À l'opposé, pour les deux cultivars, les plants $I_{50\%-N}$ avaient le meilleur CUA du N de l'engrais en saison et tendaient à être les plus développés. Pour la 'Norland', ces avantages ne se sont pas traduits par un rendement vendable (RV) plus élevé. Par contre, le RV des plants $I_{65\% - N}$ a été réduit de 4,0 t ha^{-1} ($P < 0,05$). Dans le cas de la 'Russet B.', le RV des plants $I_{50\%-N}$ a toutefois été haussé de 4,6 t ha^{-1} , comparativement aux plants I_0-N . Ce gain est d'autant plus positif que pour les deux cultivars, le CUA final du N des engrais des plants $I_{50\%-N}$ était similaire à celui des plants I_0-N , de même que les teneurs en $N\text{-NO}_3$ des eaux lessivées. En 2009, moins de différences ont été présentes étant donné le départ tardif de l'irrigation. Quoi qu'il en soit, le RV des plants $I_{50\%-N}$ de la 'Russet B.' tendait à être plus élevé que celui des plants I_0-N . De plus, le CUA final du N de l'engrais des plants $I_{50\%-N}$ était supérieur, avec 27 kg de N ha^{-1} de plus de prélevés, générant ainsi un bénéfice environnemental. Enfin, selon l'analyse économique, les profits n'ont pas été augmentés avec l'irrigation pour la 'Norland'. Par contre, ils l'ont été de 12 et 23 % en 2009 et 2010, respectivement, dans le cas de la 'Russet B.' Les bénéfices économiques de l'irrigation sont donc compatibles avec les gains environnementaux lorsque la gestion de l'irrigation est raisonnée, ce qui est d'autant plus important que l'irrigation donne des résultats différents selon les cultivars et les saisons.

2 DESCRIPTION DU PROJET

2.1 Introduction

Le manque d'information au sujet de la faisabilité économique de l'irrigation dans la culture de la pomme de terre freine l'expansion de cette pratique. Pourtant, la nature des sols cultivés en pommes de terre, généralement sableux, pourrait justifier le recours à cette pratique. D'autant plus que la pomme de terre présente des besoins élevés en azote (N) et que les sols sableux en fournissent peu. Conséquemment, des quantités importantes d'engrais azotés doivent être apportées annuellement. Toutefois, le coefficient d'utilisation apparente (CUA) du N de l'engrais par la pomme de terre non irriguée en conditions culturales québécoises est faible, souvent inférieur à 60 %. Ainsi, la proportion non prélevée du N des engrais par la culture est sujette au lessivage, d'autant plus que la nature des sols en culture est favorable à un drainage rapide de l'eau.

De cette problématique émergent des impacts économiques et environnementaux à considérer. Par exemple, des travaux de recherche, dont certains échelonnés sur 5 ans, réalisés au Québec dans des sols cultivés en pommes de terre, ont démontré que le lessivage du N atteint régulièrement 116 kg N ha^{-1} . Ceci est notable sachant que la dose moyenne de N à appliquer, recommandée par le Guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2010), est de 135 à 175 kg N ha^{-1} en sol sableux. En 2000, la Fédération des producteurs de pommes de terre du Québec (FPPTQ) a d'ailleurs décrétée que la pollution diffuse attribuable au N est une problématique prioritaire. On comprend ainsi que le lessivage des nitrates peut représenter un risque important, le plus probable de se produire, sous une irrigation conduite de façon non raisonnée.

Il y a donc un gain certain à vérifier les bénéfices découlant de l'adoption d'une gestion raisonnée de l'irrigation, pratiquée selon des consignes établies en fonction des caractéristiques du sol et suivies avec une technologie conviviale. Une telle gestion, qui tient compte de la capacité de rétention en eau du sol et des besoins en eau de la culture, permet de maintenir la disponibilité de l'eau à la plante afin de favoriser un meilleur prélèvement du N des engrais. Ainsi, la perte par gravité de l'eau excédentaire et donc des nitrates qu'elle contient, dans le milieu récepteur, serait minimisée. C'est pourquoi ce projet ayant trait à la gestion raisonnée de l'irrigation, qui intègre une démonstration économique, est pertinent et nécessaire. Globalement, le projet vise à évaluer l'impact de différentes consignes d'irrigation, sous gestion tensiométrique, sur deux cultivars de pomme de terre, fertilisés ou non en N. Les critères pour déclencher le système d'irrigation par aspersion sont, entre autres, basés sur la capacité de rétention en eau du sol. De plus, le modèle français IRRINOV[®] et la méthode du bilan hydrique sont à l'étude pour vérifier leur potentiel d'utilisation en conditions culturales du Québec.

2.2 Objectif général

Optimiser l'utilisation des ressources eau et azote dans la culture de pomme de terre afin de maximiser les gains économiques et environnementaux dans un optique de développement durable par l'établissement de meilleures pratiques de gestion de l'irrigation.

2.3 Objectifs spécifiques

- Éprouver la gestion tensiométrique de l'irrigation basée sur les caractéristiques physiques du sol en étudiant son impact sur :
 - Le développement et la nutrition de la pomme de terre;
 - L'utilisation de l'azote (N) par la culture afin d'estimer les coûts économiques de la part non utilisée des engrais N;
 - Les gains économiques par comparaison des rendements commercialisables (incluant quantité et poids spécifique des tubercules, maladies majeures et teneurs en nitrates);
 - Le gain environnemental par le suivi lysimétrique des pertes d'azote à l'environnement par le lessivage des nitrates.
- Mettre à l'essai la méthode de pilotage de l'irrigation française IRRINOV[®] afin d'expérimenter son potentiel d'utilisation au Québec.
- Mettre à l'essai la méthode du bilan hydrique pour la saison de culture afin de vérifier son utilité comme méthode de pilotage de l'irrigation.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1 Mise en place de l'expérience

Cette étude s'est échelonnée sur deux ans à la Station de recherche de Deschambault, du printemps 2009 à l'automne 2010, dans un sol de type loam sableux dont les caractéristiques sont présentées au Tableau 1. Deux cultivars ayant une période de maturation différente étaient à l'étude, soit le cultivar hâtif Norland et le cultivar à croissance indéterminée, plus tardif, Russet Burbank (Russet B.). Les dates de plantation, de récolte et d'apports en fertilisants sont résumées au Tableau 2. Les cultivars ont été plantés à une densité de 43 011 et 26 882 plants ha⁻¹ pour la 'Norland' et la 'Russet B.', respectivement, avec des tubercules entiers certifiés Élite-4. Le calibre des plantons de la 'Norland' étaient de 1-1/2 à 4 oz, alors que celui des plantons de 'Russet B.' étaient de 1-1/2 à 6 oz. L'espacement entre les plantons était, respectivement, de 0,25 m et de 0,40 m pour la 'Norland' et la 'Russet B.' et celui entre les rangs était de 0,93 m pour les deux cultivars.

Tableau 1. Caractérisation du sol lors des deux années de l'étude au site de Deschambault.

Paramètres [†]	2009	2010
pH _{eau}	5,88	5,98
Matières organiques (MO) (%)	2,08	2,12
N _{tot} (mg kg ⁻¹ b.s.)	993	935
Éléments Mehlich-3 (mg kg ⁻¹ b.s.)		
P	162	177
K	71	71
Ca	567	559
Mg	23	25
Al	1441	1520
P/Al (%)	11,2	11,6

[†]Tous les paramètres ont été analysés dans la couche 0-20 cm de sol, excepté les nitrates qui ont été dosés dans la strate 0-30 cm.

Tableau 2. Dates de plantation, de récolte et d'apports en fertilisants pour les cultivars Norland et Russet B. au cours des deux années de l'étude.

	'Norland'		'Russet B.'	
	2009	2010	2009	2010
Fertilisation de départ et plantation (N, P, K)	19 mai	17 mai	20 mai	18 mai
Fertilisation au fractionnement (N)	30 juin	28 juin	30 juin	28 juin
Défanage	22 août	20 août	16 septembre	10 septembre
Récolte	16 septembre	1 septembre	16 octobre	18 octobre

Les engrais ont été appliqués en bande à la main lors de la plantation. Les engrais ont été placés dans un sillon central sur le rang, quelques centimètres sous la semence, une mince couche de sol séparant les deux. La totalité des engrais phosphatés et potassiques a alors été apportée. Par contre, l'engrais azoté a été fractionné en deux doses (Tableau 2). Les engrais utilisés étaient le 27-0-0 et le 0-46-0 pour les apports en azote (N) et phosphore (P), respectivement. Pour le potassium (K), le 0-0-60, le 0-0-50 et le 0-0-22-11 ont été employés. La dose fractionnée de N a aussi été apportée en bande, à la main, 50 % de chaque côté des plants. Les quantités d'engrais ont été fixées selon la grille de référence en fertilisation pour la pomme de terre du Guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ, 2003). Les plants ont donc reçu, les deux années, 100 kg de P_2O_5 ha^{-1} et 150 kg de K_2O ha^{-1} . Pour ce qui est du N, en 2009, les deux cultivars ont reçu 80 kg N ha^{-1} à la plantation et 70 kg N ha^{-1} au fractionnement, pour une fertilisation totale de 150 kg N ha^{-1} . Toutefois, en 2010, la fertilisation en N a été ajustée selon les cultivars. Ainsi, la fertilisation pour la 'Norland' est demeurée similaire à celle de 2009, mais la 'Russet B.' en a reçu un peu plus au fractionnement (120 kg N ha^{-1}), pour un total de 200 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).

Par la suite, chacune des parcelles a été équipée d'un lysimètre à succion d'une longueur de 93 cm (modèle 1900L36-BO2M2 d'Hoskin Scientific). L'installation des lysimètres s'est effectuée immédiatement après la plantation, de façon à ce qu'il n'y ait pas d'averse de pluie entre l'application des engrais et l'installation des lysimètres (Figure 1). Ceux-ci ont été installés à une profondeur permettant le captage des eaux de lessivage et du nitrate ($N-NO_3$) qu'elles contiennent, descendant sous les 65 cm, i.e. en dehors de la zone racinaire.



Figure 1. Lysimètre à succion et tensiomètre modèle T-80 en arrière-plan.

Par la suite, peu avant l'émergence des plants, le système d'irrigation par aspersion a été mis en place (Figure 2). Un gicleur a été installé dans chacune des parcelles afin de pouvoir les irriguer individuellement. Les caractéristiques du système d'irrigation utilisé sont les suivantes : les gicleurs étaient individuellement reliés à une valve et chacun avait un régulateur de pression de 1,72 bar (25 PSI) qui permettait de maintenir le débit (22 litres par minute ou 5,8 gallons USA par minute) plus uniforme lorsque plusieurs gicleurs fonctionnaient simultanément. Chacune des parcelles a également été équipée d'un tensiomètre (modèle Tx-80 d'HORTAU) afin de gérer les apports en eau individuellement. 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. 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).



Figure 2. Système d'irrigation par aspersion au site expérimental de Deschambault, 2010.

3.2 Traitements

La présente étude comparait cinq traitements, incluant trois consignes d'irrigation, ainsi que des témoins non fertilisés en N afin de pouvoir évaluer l'impact de l'irrigation non seulement sur le N des engrais, mais également sur la fourniture naturelle en N du sol. Les irrigations étaient déclenchées dès que la valeur de la tension de l'eau dans le sol mesurée par le tensiomètre atteignait la consigne de déclenchement du traitement. Ces valeurs de tension ont été déterminées en tenant compte des caractéristiques du sol (courbes de désorption en eau). De plus, les temps d'irrigation ont été ajustés selon la profondeur d'enracinement durant la saison (Figure 3). Les cinq traitements auxquels les cultivars Norland et Russet B. ont été soumis sont les suivants :

- A. Témoin non irrigué et non fertilisé en azote (I_0-N_0);
- B. Témoin irrigué à partir de 65 % de la réserve utile en eau du sol (RU) et non fertilisé en azote ($I_{65\%}-N_0$);
- C. Témoin non irrigué et fertilisé en azote (I_0-N);
- D. Irrigation à partir de 50 % de la RU et fertilisé en azote ($I_{50\%}-N$);
- E. Irrigation à partir de 65 % de la RU et fertilisé en azote ($I_{65\%}-N$).

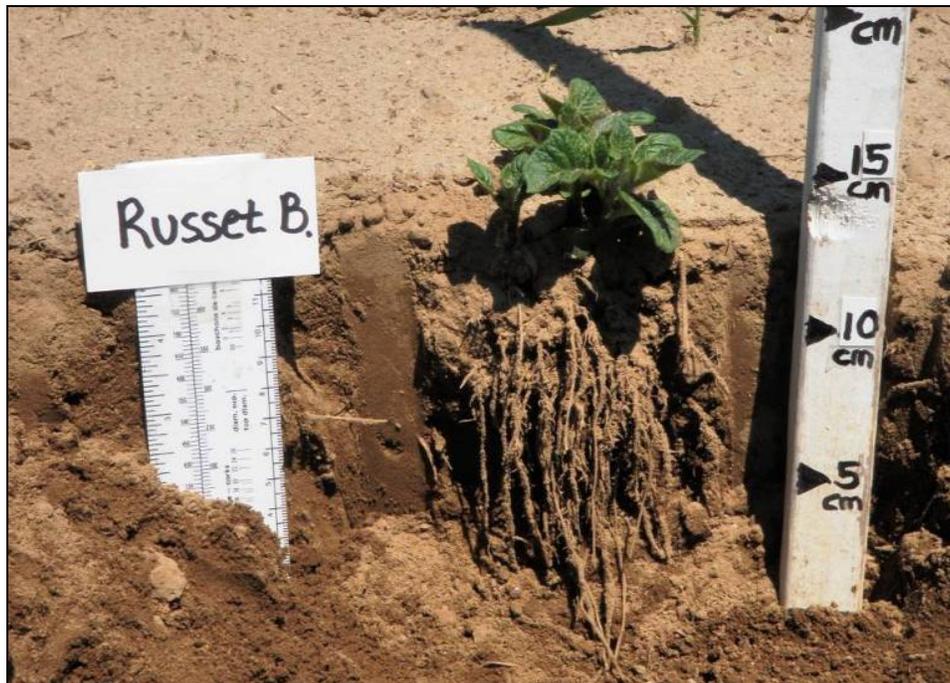


Figure 3. Suivi de la profondeur d'enracinement en cours de saison.

3.3 Dispositif expérimental

Les cinq traitements, répétés quatre fois (blocs), ont été assignés selon un dispositif en tiroirs (split-plot) pour un total de huit parcelles principales et 40 sous-parcelles. Les cultivars étaient en parcelles principales et les traitements d'irrigation en sous-parcelles. Les parcelles principales étaient composées de huit rangs de 7,5 m de long (figure 4).

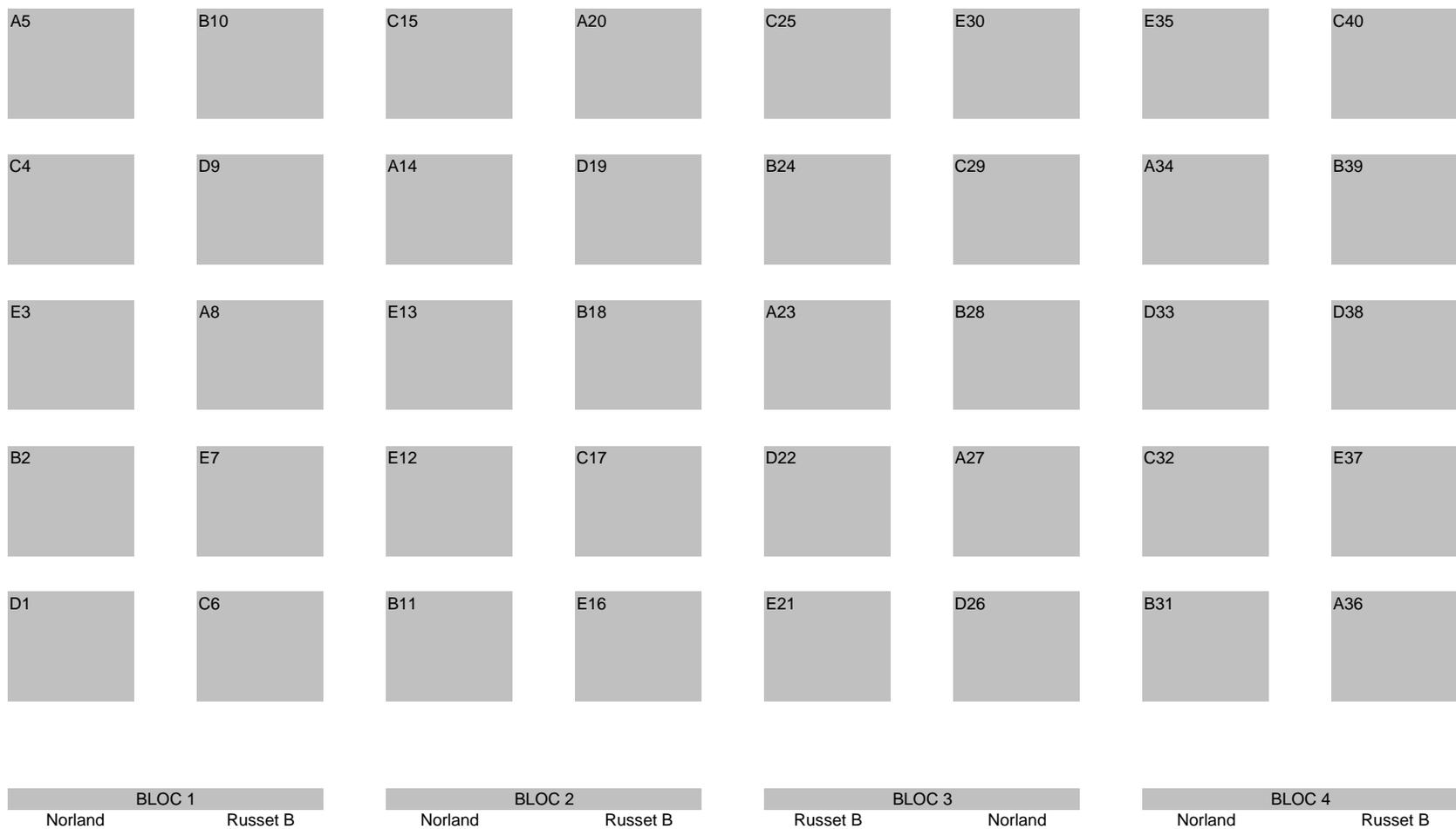


Figure 4. Dispositif expérimental au site de Deschambault en 2009 et 2010.

3.4 Collecte des données

3.4.1 Analyses physiques et chimiques de sol

Les analyses de sol ont été réalisées sur des échantillons composites prélevés dans la strate de sol 0-20 cm, excepté ceux pour mesurer la masse volumique apparente (MVA) et le N-NO₃ qui ont été faits dans la strate 0-30 cm. Chaque printemps, un premier échantillonnage par bloc a eu lieu pour effectuer la caractérisation. Par la suite, les échantillons étaient prélevés dans chacune des parcelles au stade 50-75 % de floraison, à la récolte et à l'automne en post-récolte. Lors de chacun des échantillonnages, les sols ont été placés dans une glacière et conservés à 4 °C jusqu'à leur analyse. Les sols ont été tamisés à 2 mm puis séchés à l'air à 21 °C, excepté ceux servant au dosage du N-NO₃ qui eux ont été tamisés frais. Les valeurs obtenues ont été rapportées en kg ha⁻¹ sur base sèche (b.s.) en utilisant la MVA qui a été mesurée simultanément. La MVA a été mesurée avec des cylindres de sol séché à 105 °C puis pesé. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points suivis 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). Le contenu en MO totale a été mesuré selon la méthode d'oxydation par voie humide de Walkley Black (Allison, 1965). Le N_{tot}, préalablement extrait par digestion Kjeldahl, a été déterminé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon (McGill et Figueiredo, 1993). Le N-NO₃ des échantillons de sol a été extrait au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminé par colorimétrie autoanalyseur Technicon. Le P et les éléments mineurs ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et Simard, 1993) et dosés à l'ICP optique. Des échantillons de sol non perturbé ont également été prélevés dans chacun des quatre blocs lors de l'année d'implantation afin d'établir en laboratoire les courbes de désorption en eau des sols (Topp et coll., 1993).

3.4.2 Développement et nutrition de la pomme de terre

3.4.2.1 Masse des plants, prélèvement en N et coefficient d'utilisation apparente du N

À deux reprises pendant la saison, soit aux stades 50-75 % de floraison et défanage, la biomasse aérienne entière des plants (fanés) a été déterminée pour calculer leur taux en matières sèches (MS) et leur teneur en N_{tot}. Ces paramètres étaient ensuite multipliés pour calculer les prélèvements en N_{tot} des fanés. Quatre plants étaient prélevés dans chacune des parcelles, puis séchés à 65 °C et broyés à 100 mesh pour former un échantillon composite sur lequel les analyses de laboratoire ont été exécutées. Le N_{tot} a été extrait par digestion Kjeldahl (Isaac et Johnson, 1976) et dosé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon. Par ailleurs, lors de la récolte, un échantillon composite de cinq tubercules sains, non-pelés et nettoyés, a été prélevé dans chacune des parcelles avant de faire le classement des tubercules. Ceux-ci étaient découpés en bâtons, puis séchés à 65 °C et finalement broyés. Le N_{tot} a été extrait et dosé tel que décrit précédemment pour les plants. Les exportations en éléments ont ainsi pu être calculées, de même que les prélèvements partiels (floraison) et totaux (PVL_{tot}). Ces paramètres ont été calculés comme suit :

$$PVL_{\text{saison}} X = (\text{MS} * \text{concentration en X}) \text{ des plants à la floraison}$$

$$\text{Exportations de X} = (\text{MS en tubercules} * \text{concentration en X des tubercules}) \text{ récolte totale}$$

$$PVL_{\text{tot}} X = (\text{MS} * \text{concentration en X}) \text{ des plants au défanage} + \text{Exportations en X}$$

Une fois les PVL_{tot} connus pour chacun des traitements, le coefficient d'utilisation apparente (CUA) du N a pu être calculé. Le CUA s'établit en comparant la quantité de N fournie par les engrais en comparaison de ce que le sol seul fournit. Pour obtenir le coefficient d'efficacité (CE) des diverses régies d'irrigation à l'essai, le CUA du N obtenu pour chacune des régies est ensuite comparé à celui obtenu avec la régie usuelle (non irriguée fertilisée), 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) :

$$(1) \text{ CUA N des engrais } I_{0\text{-N}} (\%) = \frac{PVL_{tot} \text{ N traitement } I_{0\text{-N}} - PVL_{tot} \text{ N témoin } I_{0\text{-N}_0}}{\text{Dose de N apportée en engrais minéral pour } I_{0\text{-N}}}$$

$$(2) \text{ CUA N des engrais } I_{50\text{\%-N}} (\%) = \frac{PVL_{tot} \text{ N traitement } I_{50\text{\%-N}} - PVL_{tot} \text{ N témoin } I_{0\text{-N}_0}}{\text{Dose de N apportée en engrais minéral pour } I_{50\text{\%-N}}}$$

$$(3) \text{ CE } (\%) = \frac{\text{CUA } I_{50\text{\%-N}}}{\text{CUA } I_{0\text{-N}}}$$

Ce coefficient permet de comparer l'efficacité fertilisante du N des engrais selon les consignes d'irrigation testées.

3.4.2.2 Analyse du N_{tot} de la 4^e feuille mature

L'analyse du N_{tot} de la 4^e feuille mature des plants, reconnue comme l'indicateur nutritionnel le plus fiable dans la culture de la pomme de terre, a aussi été réalisée au stade 50-75 % de floraison. Dans chacune des parcelles, 10 feuilles ont été prélevées, séchées à 65 °C et broyées ensemble à 100 mesh pour former un échantillon composite sur lequel les analyses de laboratoire ont été exécutées. Les échantillons frais ont été prélevés en avant-midi et conservés dans une glacière entre leur prélèvement au champ et leur réception au laboratoire. De plus, les feuilles ont été prélevées avant midi. Le N_{tot} a été extrait par digestion Kjeldahl (Isaac et Johnson, 1976) et dosé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon.

3.4.2.3 Récolte des tubercules

Lors de la récolte, les rendements ont été mesurés à partir des tubercules récoltés sur quatre mètres sur chacun des deux rangs centraux de chacune des parcelles. Les tubercules ont été classés par calibre. Les rendements totaux et vendables (Ronde : Canada N° 1 excluant les grelots de 3/4 à 1-5/8 po de diamètre; longue : Canada N° 1 excluant les grelots de moins de 2 po de diamètre) ont été déterminés. La qualité des tubercules a aussi été établie et la présence de gale commune (*Streptomyces scabies*) a été évaluée. L'évaluation du degré d'infestation des tubercules par la gale commune a été réalisée à partir d'une méthode développée par Otrysko et Banville de la Station de recherche Les Buissons du MAPAQ. L'indice de gale calculé par cette méthode utilise un facteur de pondération variant de 1 à 5, qui tient compte à la fois de l'étendue et du type de symptôme observé sur les tubercules. Vingt-cinq tubercules (calibre Canada N° 1) ont été prélevés de façon aléatoire dans chacun des lots récoltés. Chacun des tubercules a été classé selon une sévérité croissante des dégâts (superficiels, pustules, confluent ou creux

profonds) et selon la superficie couverte par les dommages sur le tubercule (0 % à trace, trace à 5 %, 5-20 %, 20-40 %, 40 % et +). Le nombre total de tubercules par catégorie a ensuite été calculé. Le facteur de pondération approprié a été attribué à chacune des catégories en fonction de l'intensité de la combinaison sévérité et étendue des dommages. L'indice de gale a été calculé en additionnant les résultats issus de la multiplication du nombre de tubercules d'une catégorie par son facteur de pondération, puis en divisant cette somme par le nombre total de tubercules évalués. 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 issu de la division du poids dans l'air par la différence entre le poids dans l'air et celui dans l'eau.

3.4.2.4 Récoltes périodiques

À différents moments durant la saison 2009 et celle de 2010, des récoltes périodiques ont été effectuées. Pour le cultivar hâtif Norland, celles-ci s'élevaient au nombre de trois et au nombre de cinq pour le cultivar plus tardif Russet B. Lors de ces récoltes, la production totale en tubercules de trois plants consécutifs a été mesurée et classée selon le poids unitaire de chacun des tubercules.

3.4.2.5 Densité racinaire

La méthode utilisée pour mesurer la distribution et la densité racinaire s'inspire de celle présentée par Munoz-Arboleda et coll. (2006). Une « trancheuse » de sol a été fabriquée avec deux plaques d'acier maintenues à 10 cm l'une de l'autre à l'aide de blocs de bois. La largeur des plaques était de 93 cm, soit la largeur des buttes de sol, alors que la hauteur était de 36 cm (Figure 5). La « trancheuse », une fois positionnée au-dessus d'un plant de pommes de terre préalablement coupé au ras du sol, était enfoncée dans la butte de sol à l'aide de coups de masse (Figure 6). Par la suite, la trancheuse était déterrée, sortie délicatement du rang, et placée à l'horizontale sur une table. Par la suite, la plaque d'acier du dessus était enlevée et 16 zones de sol étaient alors « découpées » selon le patron présenté à la Figure 7. Les échantillons recueillis furent placés dans des sacs de plastique et entreposés à 4° C jusqu'au tamisage en laboratoire. Le volume théorique des 16 zones variait entre 1800 à 1980 cm³. Toutefois, avant le tamisage des échantillons de sol, leur volume réel était mesuré en plongeant le sac dans un volume d'eau connu. Cette valeur était importante afin de connaître la densité réelle des racines par cm³ de sol. Les blocs de sol (zones 1 à 16) étaient ensuite passés dans deux tamis superposés (9,5 et 2 mm) avec de l'eau afin d'en isoler les racines. Celles-ci étaient alors récupérées à la main sur les tamis et entreposées dans une solution d'Azide de sodium à 4° C jusqu'à la numérisation des échantillons racinaires. Ceux-ci étaient suite analysés à l'aide du logiciel WinRHIZO (version Regular) de Regent Instruments où chaque segment de racine est caractérisé selon sa longueur et son diamètre. Il est à noter qu'il a été impossible d'analyser les zones 13 à 16 avec le logiciel, car la quantité de détrit (matières autres que des racines) présente dans ces zones était trop importante pour que le logiciel puisse en discriminer les racines. Conséquemment, seule une évaluation qualitative a été effectuée pour ces zones.



Figure 5. Trancheuse utilisée pour prélever le sol servant à mesurer la distribution et la densité racinaire.



Figure 6. Enfouissement de la trancheuse dans la butte de sol.

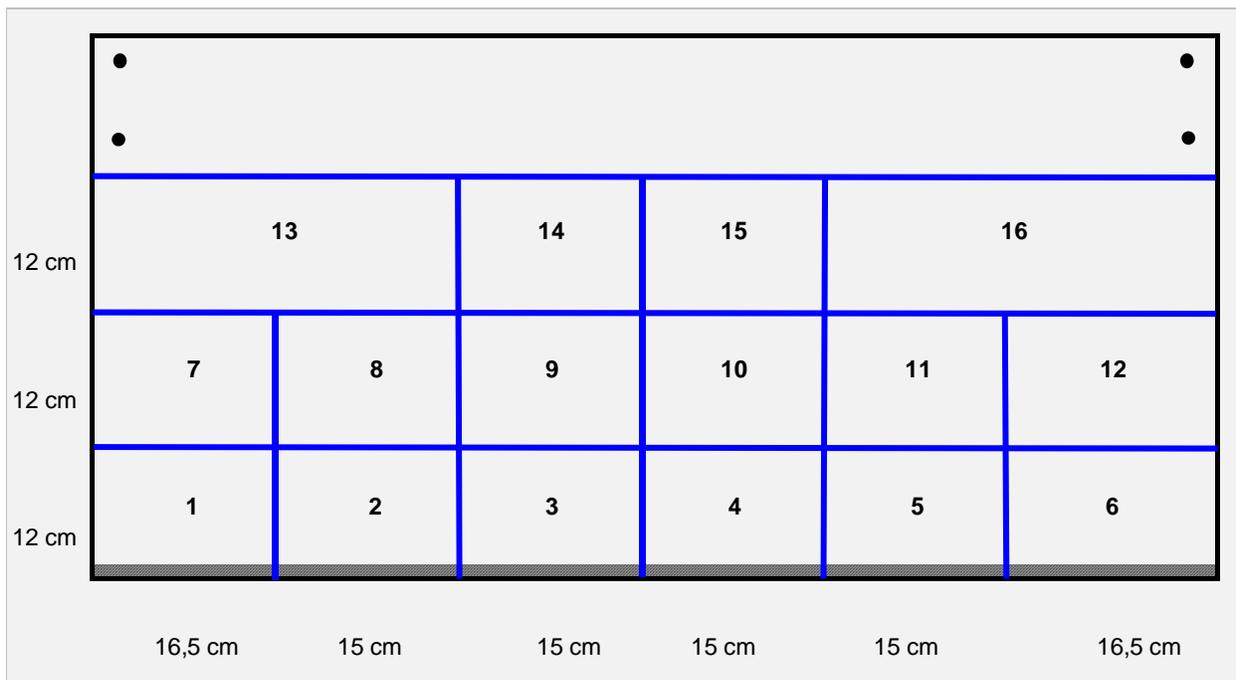


Figure 7. Schéma de la « trancheuse » de sol avec les 16 zones considérées.

3.4.3 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 21 et 23 semaines, en 2009 et 2010, respectivement. Lors de chacun des échantillonnages, les lysimètres étaient remis sous tension (80 kPa) manuellement. De plus, un suivi bi-hebdomadaire était fait afin de s'assurer que les lysimètres ne déchargeaient pas en cours de semaine. Les échantillons récoltés d'eau drainée étaient conservés dans une glacière jusqu'à leur réception au laboratoire, où ils étaient congelés jusqu'à leur analyse. Le N-NO₃ contenu dans les échantillons a été dosé par colorimétrie automatisée à flot continu (FIA) après filtration de l'eau à 0,45 micron.

3.4.4 Tension de l'eau dans le sol, Irrinov[®] et technique du bilan hydrique

La pluviométrie, la température, l'humidité relative de l'air ambiant, la vitesse et la direction du vent ainsi que la radiation solaire ont été mesurées tout au long de la saison. Ces données ont été mesurées en continu, aux 15 minutes, pour les deux saisons. La tension de l'eau dans le sol des parcelles expérimentales était également mesurée en continu jusqu'à la récolte, afin de gérer le déclenchement des épisodes d'irrigation. 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.

4 RÉSULTATS ET ANALYSE

4.1 Impact d'une gestion tensiométrique de l'irrigation basée sur les caractéristiques physiques du sol

4.1.1 Apports en eau durant la saison

Le nombre effectué d'épisodes d'irrigation en 2009 et 2010 est rapporté au Tableau 3 et au Tableau 4, selon le cultivar et la régie d'irrigation. Cette compilation tient compte de la période où les irrigations ont été effectuées. Ces périodes sont exprimées en termes de jours après plantation (JAP) et délimitées par les récoltes périodiques. Ainsi, la dernière journée de chacune de ces périodes correspond au moment où une récolte périodique a été effectuée. De plus, les épisodes d'irrigation étaient comptabilisés pour chacune des parcelles d'un même traitement. Chaque épisode représente donc l'irrigation d'une parcelle de ce traitement et non l'ensemble des parcelles du traitement. Conséquemment, le nombre moyen d'irrigations par traitement est présenté à l'extrême droite des tableaux.

Tableau 3. Nombre effectué d'épisodes d'irrigation en 2009 selon le traitement et la période.

Cultivar	Traitement	Nombre d'irrigation par parcelle par période (JAP)					Total	Nb irrigation par traitement
		1-63	64-78	79-91	92-106	107-149		
Russet B.	I _{65%} - N ₀ (B)	2	0	0	5	8	15	3,8
	I _{50%} - N (D)	0	0	0	2	3	5	1,3
	I _{65%} - N (E)	1	0	0	3	3	7	1,8
Norland	I _{65%} - N ₀ (B)	2	0	5	0	-	7	1,8
	I _{50%} - N (D)	0	0	2	0	-	2	0,5
	I _{65%} - N (E)	4	0	5	0	-	9	2,3

Tableau 4. Nombre effectué d'épisodes d'irrigation en 2010 selon le traitement et la période.

Cultivar	Traitement	Nombre d'irrigation par parcelle par période (JAP)					Total	Nb irrigation par traitement
		1-63	64-79	80-94	95-109	110-153		
Russet B.	I _{65%} - N ₀ (B)	45	16	7	12	0	80	20,0
	I _{50%} - N (D)	9	5	1	0	0	15	3,8
	I _{65%} - N (E)	40	16	4	13	0	73	18,3
Norland	I _{65%} - N ₀ (B)	32	11	4	0	-	47	11,8
	I _{50%} - N (D)	5	4	0	0	-	9	2,3
	I _{65%} - N (E)	54	18	4	0	-	76	19,0

Lorsque les deux saisons sont comparées, il ressort que 87 % des épisodes d'irrigation ont été réalisés en 2010, l'été 2009 ayant été davantage pluvieux. En fait, en 2009, peu d'épisodes d'irrigation ont été effectués dans la première moitié de la saison pour chacun des cultivars. Par ailleurs, les deux années, le cultivar Russet B. a reçu davantage d'irrigation que le cultivar Norland et dans une proportion qui se maintient à chacune des saisons, soit 60-40 en faveur de la 'Russet B.'. Cette situation s'explique en partie par la saison de croissance plus étendue de la 'Russet B.', plus tardive que la 'Norland' (Tableau 2). Enfin, davantage d'épisodes d'irrigation ont été effectués dans les parcelles non fertilisées I_{65%}-N₀ (B) de la 'Russet B.', comparativement aux parcelles fertilisées en N ayant la même consigne d'irrigation I_{65%}-N (E). Cette situation peut s'expliquer par le faible développement des plants non fertilisés en N. En effet, comme le

recouvrement du sol par les plants est plus faible, les pertes en eau par évaporation sont plus importantes. Enfin, un peu plus de 60 % des épisodes d'irrigation ont été effectués durant la première moitié de la saison en 2010.

4.1.2 Développement et nutrition des plants en saison

Les analyses foliaires effectuées au stade pleine floraison démontrent, premièrement, que les plants non fertilisés I_0-N_0 (A) et $I_{65\%}-N_0$ (B) des deux cultivars sont déficients en N (Figure 8 et Figure 9). Leurs contenus en N_{tot} sont sous le seuil de suffisance, contrairement aux plants fertilisés. Seule exception, les plants 'Norland' I_0-N_0 (A) de 2010, présentant une teneur en N_{tot} légèrement au-dessus du seuil de suffisance, mais encore bien en deçà de celle des plants fertilisés. Deuxièmement, en 2010, les plants fertilisés les plus irrigués $I_{65\%}-N$ (E) des deux cultivars ont une teneur en N_{tot} foliaire inférieure aux plants fertilisés non irrigués $I_0\%-N$ (C), ce qui n'est pas le cas des plants moins irrigués $I_{50\%}-N$ (D). Une situation similaire s'observe même entre les deux témoins non fertilisés en N puisque les plants $I_{65\%}-N_0$ (B) ont une teneur foliaire en N_{tot} moindre que celle des plants I_0-N_0 (A). Le nombre d'épisodes d'irrigation déjà réalisés à ce stade (15 juillet 2010), beaucoup plus élevé dans les parcelles irriguées à 65 % de la RU, pourrait expliquer cette différence. En effet, à cette date précise, les traitements, $I_{65\%}-N$ (E) et $I_{65\%}-N_0$ (B) avaient déjà reçu de 5 à 10 fois plus d'épisodes d'irrigation que le traitement à 50 % de la RU (E). Les nombreux épisodes d'irrigations a ainsi peut-être favorisé un certain lessivage non seulement du N des engrais, mais aussi du N fournit par le sol, puisque le même impact s'observe dans les parcelles non fertilisées en N.

Sur ce point, la détermination du contenu en $N-NO_3$ disponible dans la strate utile de sol des parcelles fertilisées au moment de l'échantillonnage foliaire démontre clairement qu'il y a beaucoup moins de $N-NO_3$ disponible dans le sol des parcelles les plus irriguées (Figure 10 et Figure 11). Ainsi, dans les parcelles $I_{65\%}-N$ (E) du cultivar Norland, le sol contient seulement 21 kg de $N-NO_3$ ha^{-1} comparativement à 56 et 79 kg de $N-NO_3$ ha^{-1} pour les parcelles irriguées $I_{50\%}-N$ (D) et non irriguées $I_0\%-N$ (C), respectivement. Dans les parcelles du cultivar Russet B., le sol des parcelles les plus irriguées $I_{65\%}-N$ (E) contient pour sa part 100 kg de $N-NO_3$ ha^{-1} , comparativement à 110 et 163 kg de $N-NO_3$ ha^{-1} pour les parcelles irriguées $I_{50\%}-N$ (D) et non irriguées $I_0\%-N$ (C), respectivement. Une certaine proportion du $N-NO_3$ apporté par l'application de l'engrais 27-0-0 semble donc déjà avoir été perdue. Aux environs de cette date, un pic de nitrates dans les eaux de lessivage est d'ailleurs observé suite au fractionnement de l'engrais en juin, tel qu'il sera discuté à la section 4.1.5. Toutefois, il faut noter que les teneurs foliaires en N_{tot} demeurent au-dessus du seuil de suffisance pour tous les traitements fertilisés à ce moment.

Par ailleurs, les plants des parcelles irriguées $I_{50\%}-N$ (D) et $I_{65\%}-N$ (E) ne présentent pas une masse sèche inférieure à celle des plants des parcelles non irriguées $I_0\%-N$ (C) (Figure 12 et Figure 13). Ceux ayant été irrigués à 50 % de la RU tendent même à avoir produit le plus de masse. Dans le cas du cultivar Norland, les plants $I_{50\%}-N$ (D) ont ainsi une masse 24 % plus grande que celle des plants I_0-N (C) et $I_{65\%}-N$ (E). Dans le cas du cultivar Russet B., la différence est de 12 % avec les plants I_0-N (C) et devient significative à 16 % en comparaison des plants $I_{65\%}-N$ (E). Par contre, deux semaines et quatre épisodes d'irrigation plus tard (28 juillet 2010), une teinte plus jaune des feuilles pouvait être observée à l'œil nu dans certaines parcelles $I_{65\%}-N$ (E) (Figure 14 et Figure 15). Un dosage foliaire à ce moment aurait peut-être permis d'identifier une teneur marginale en N_{tot} et une croissance moindre des plants que celle des plants non irrigués I_0-N (C).

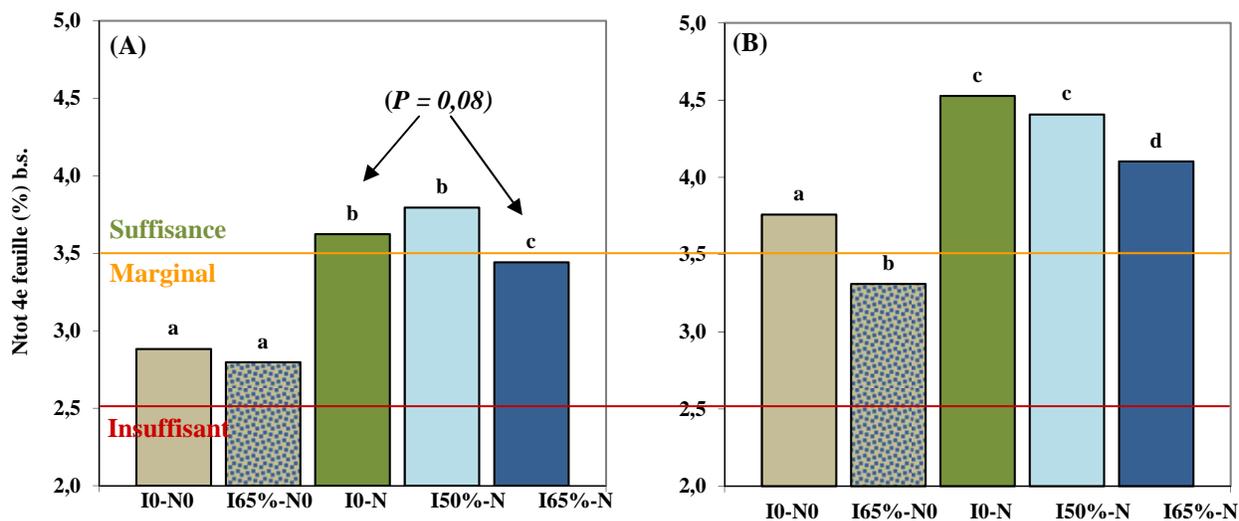


Figure 8. Teneur en N_{tot} dans la 4^e feuille mature des plants de pommes de terre ‘Norland’ en 2009 (A) et 2010 (B) au stade pleine floraison. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d’indication contraire.

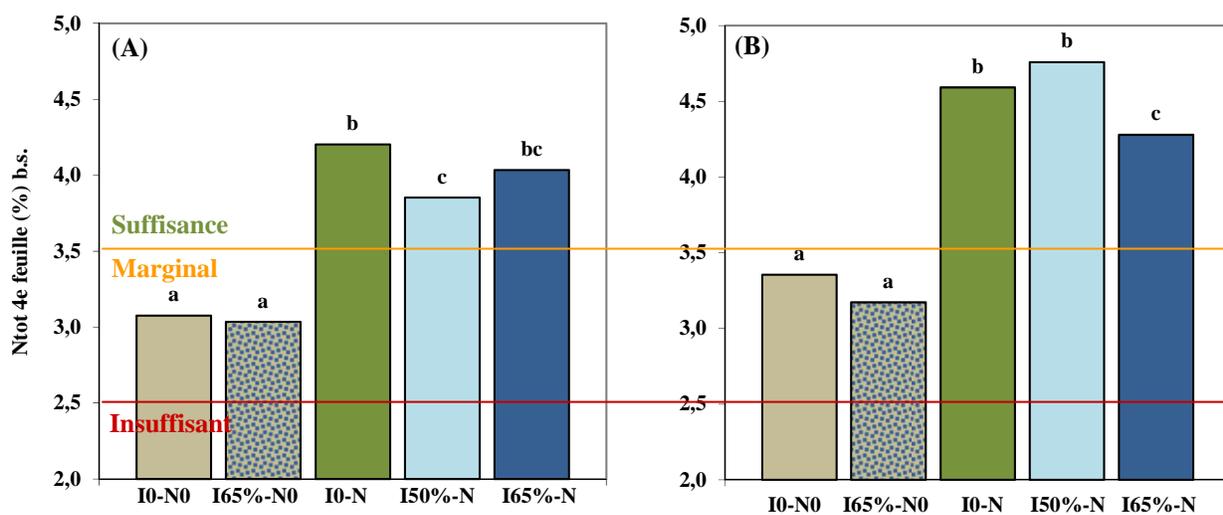


Figure 9. Teneur en N_{tot} dans la 4^e feuille mature des plants de pommes de terre ‘Russet B.’ en 2009 (A) et 2010 (B) au stade pleine floraison. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d’indication contraire.

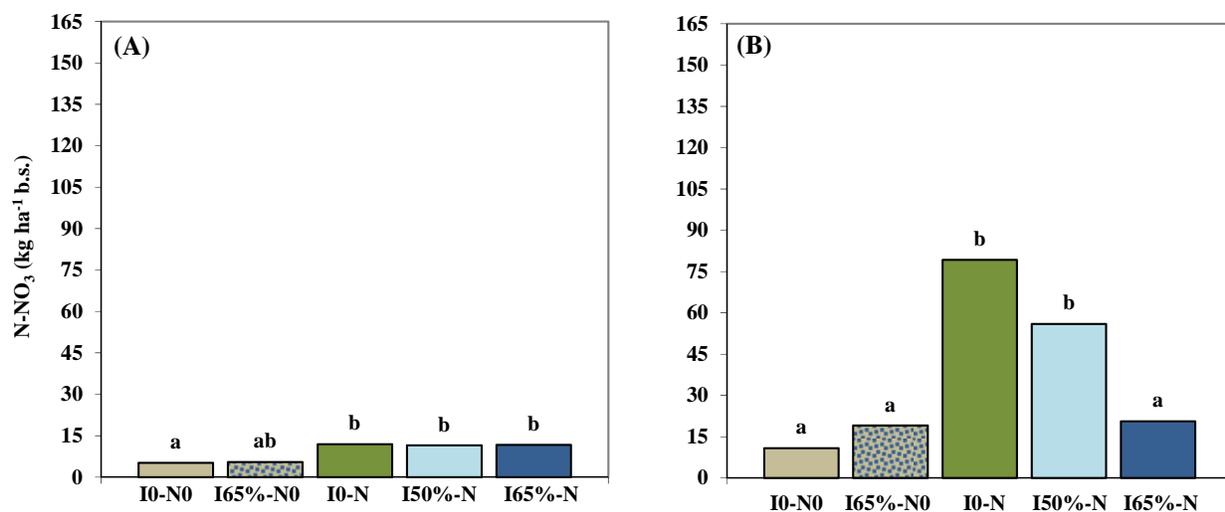


Figure 10. Contenu en nitrates disponibles dans la couche utile de sol (0-20 cm) dans les parcelles de 'Norland' en 2009 (A) et 2010 (B) au stade pleine floraison. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.

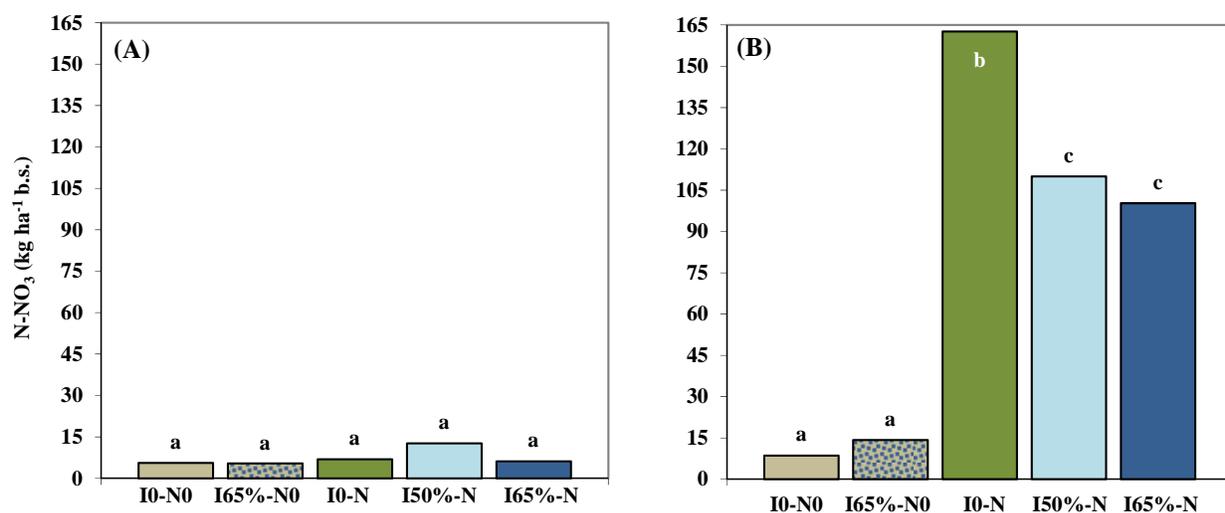


Figure 11. Contenu en nitrates disponibles dans la couche utile de sol (0-20 cm) dans les parcelles de 'Russet B.' en 2009 (A) et 2010 (B) au stade pleine floraison. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.

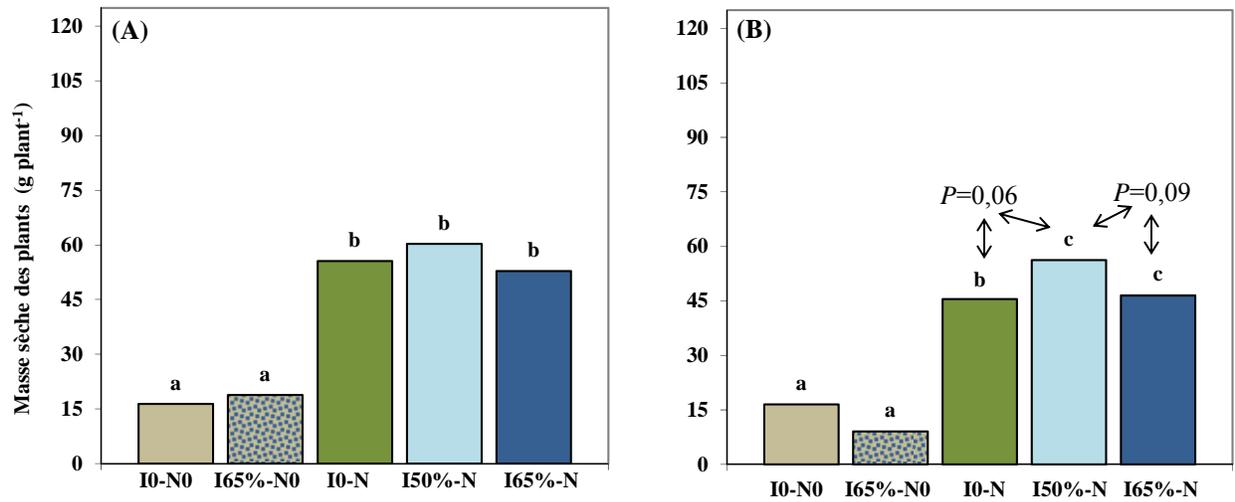


Figure 12. Masse sèche des plants de pommes de terre ‘Norland’ en 2009 (A) et 2010 (B) au stade pleine floraison. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d’indication contraire.

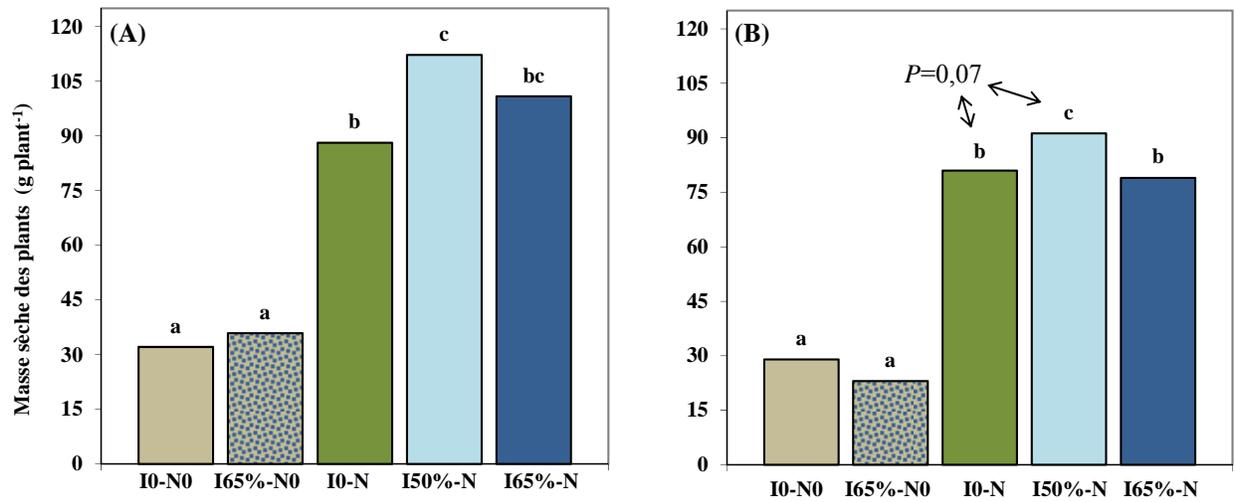


Figure 13. Masse sèche des plants de pommes de terre ‘Russet B.’ en 2009 (A) et 2010 (B) au stade pleine floraison. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d’indication contraire.

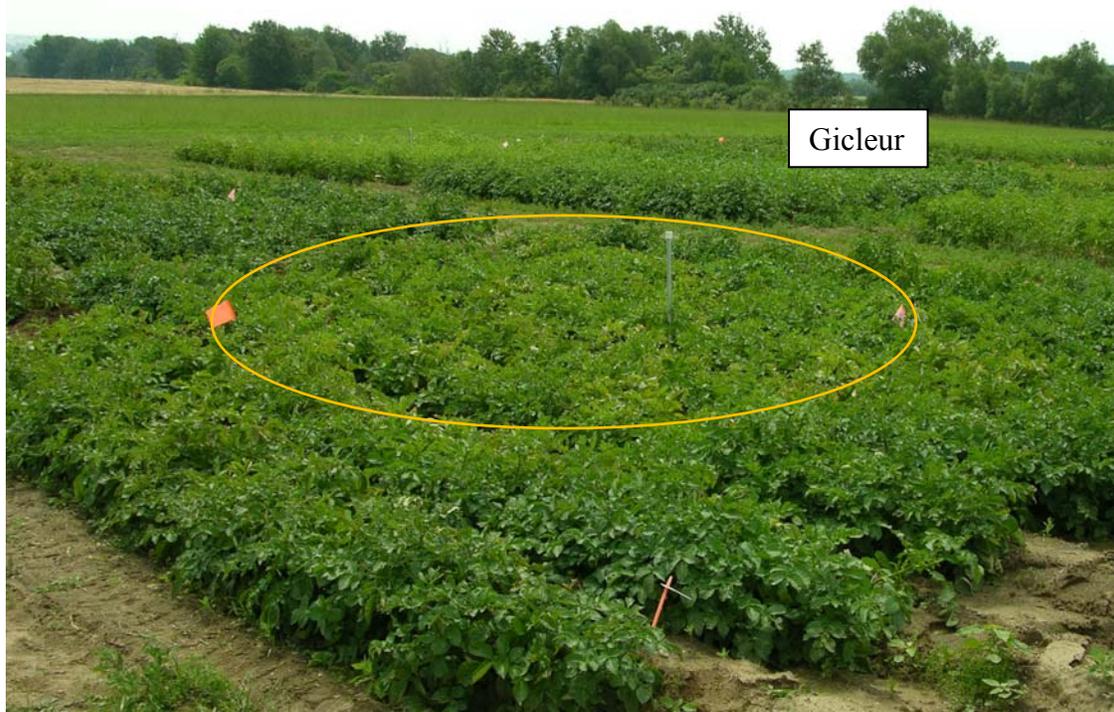


Figure 14. Zone de jaunissement apparent (cercle jaune) des plants d'une parcelle $I_{65\%}$ -N (E) de 'Russet B.' au 28 juillet 2010.



Figure 15. Parcelle non irriguée du traitement I_0 -N (C) de 'Russet B.' au 28 juillet 2010 où aucune zone de jaunissement des plants n'est visible.

4.1.2.1 Récoltes périodiques

Le suivi périodique de la production en tubercules des plants est présenté à la Figure 16. Il est à noter que les poids, établis à différents stades de développement, représentent le poids total en tubercules par plant. Globalement, ce suivi du poids total révèle tout d'abord que peu importe la saison ou le cultivar, les poids les plus faibles ont été mesurés dans les traitements sans apport de N. Autre constat, les poids totaux en tubercules mesurés en 2010 sont inférieurs à ceux de 2009, peu importe le cultivar. Cette situation, observée pour l'ensemble du Québec, est possiblement consécutive aux conditions météorologiques de la saison 2010. Ainsi, la Financière agricole rapportait que pour l'été 2010, les rendements étaient autour de la moyenne ou inférieurs à celle-ci avec la présence de tubercules plus petits.

Outre ces considérations générales, aucune différence n'a été observée entre les plants fertilisés du cultivar Russet B., qu'ils soient irrigués ou non, durant les trois premières récoltes (23 juillet, 7 et 20 août) de 2009 (Figure 16 A). Ainsi, 400, 900 et 1200 g de tubercules par plant ont été récoltés, en moyenne, pour ces traitements au 64^e, 79^e et 93^e JAP, respectivement. Ce n'est qu'à partir de la 4^e récolte (107^e JAP) que les trois courbes se distancent les unes des autres. Les épisodes d'irrigation sont justement concentrés durant cette période (20 août au 14 septembre) (Tableau 3). À partir de cette période et jusqu'à la dernière récolte effectuée le 13 octobre (146^e JAP), le poids en tubercules par plant pour le traitement où les conditions hydriques du sol sont maintenues les plus humides (I_{65%}-N) semble être plus élevé que pour le traitement irrigué à 50 % de la RU et le témoin non irrigué I₀-N.

En 2010, les apports en eau ont débuté très tôt en saison et ces derniers semblent avoir rapidement influencé le poids en tubercules (Figure 16 B). Dès la première récolte du 20 juillet (64 JAP), les courbes des traitements fertilisés en N se dissocient selon la régie d'irrigation. Ainsi, la courbe du traitement le plus irrigué (65% de la RU) se distance du traitement à 50 % de la RU et du témoin non irrigué. Cette tendance se poursuit ensuite sur l'ensemble de la saison, jusqu'à la dernière récolte. Fait intéressant, le poids en tubercules au 109^e JAP (3 septembre) est très semblable à celui mesuré au terme de la saison. Ainsi, dans le cas du cultivar Russet B., il semble que l'irrigation a eu un impact direct sur la production de tubercules par plants. De plus, cet impact semble se produire assez rapidement à partir du moment où l'irrigation est substantiellement présente.

En ce qui a trait au cultivar à maturité hâtive 'Norland', l'essentiel des apports en eau de 2009 a été appliqué en fin de croissance et ne semble pas avoir influencé le poids total final en tubercules (Figure 16 C). De plus, en 2010, bien que les épisodes d'irrigation aient débuté très tôt, ces derniers ne semblent pas avoir eu davantage d'influence sur le rendement total de ce cultivar (Figure 16 D). Ainsi, pour l'instant, les bénéfices potentiels de l'irrigation semblent être modulés selon les cultivars.

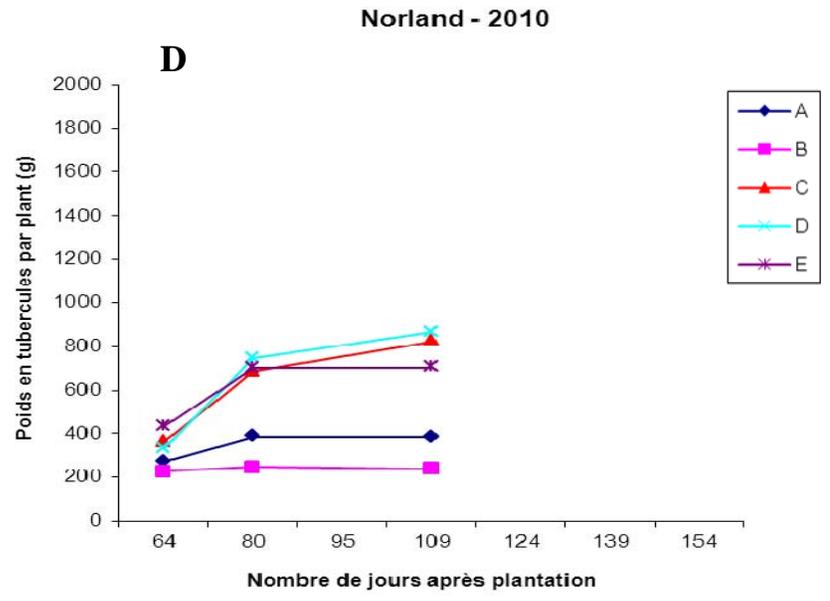
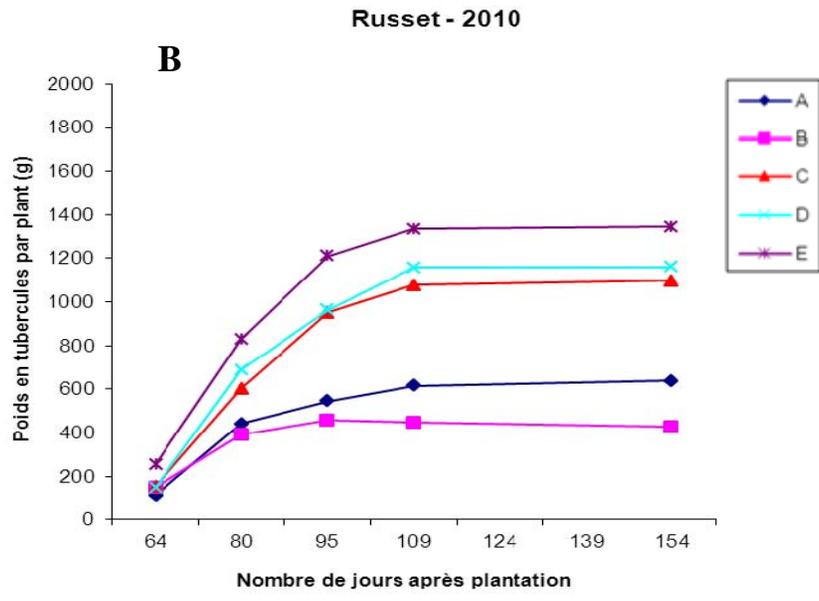
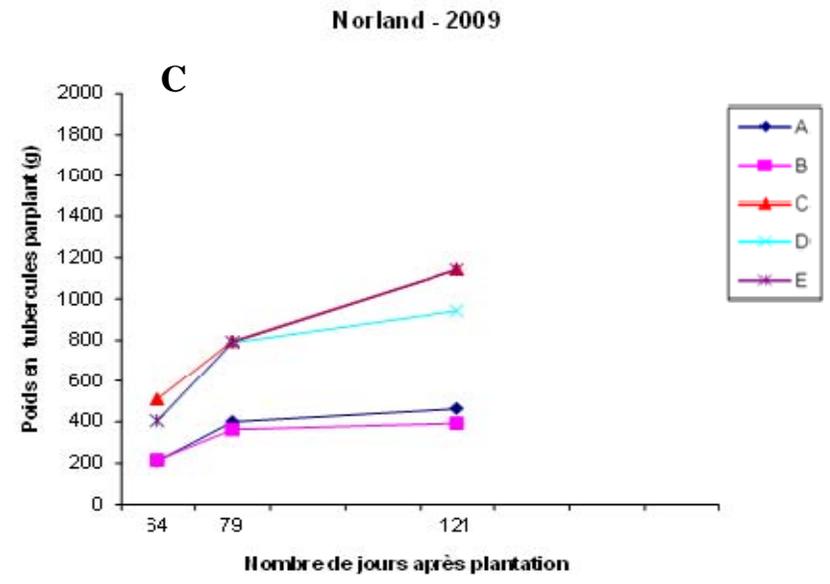
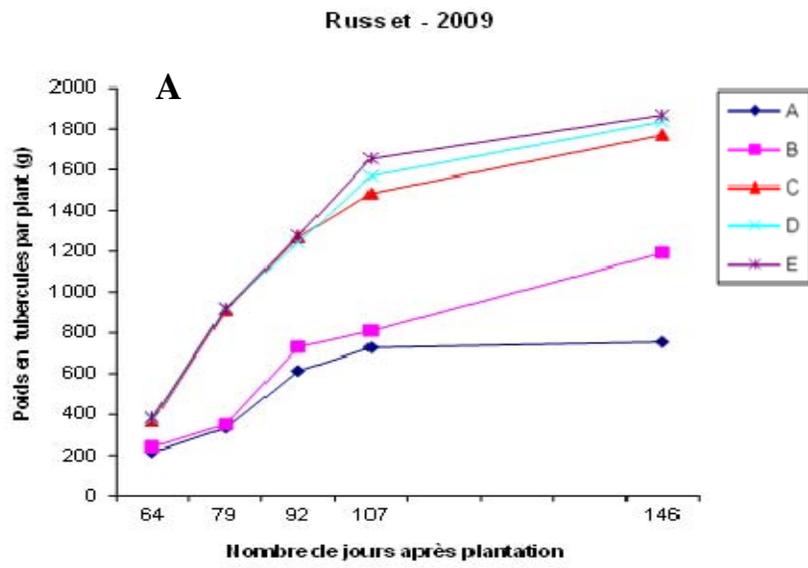


Figure 16. Récoltes périodiques effectuées en 2009 pour les cultivars Russet B. (A) et Norland (C), ainsi qu'en 2010 pour les cultivars Russet B. (B) et Norland (D).

La présente section reprend l'ensemble des récoltes périodiques où chacun des tubercules récoltés a été classé selon son poids et regroupé en catégories croissantes. À ce propos, il est à noter que les tubercules ayant un poids supérieur à 275 g ou un diamètre inférieur à 0,5 cm font partie de deux groupes distincts (Figure 17 à Figure 20). Par exemple, pour la récolte du 23 juillet 2009 (Figure 17), effectuée pour le cultivar Russet B., l'essentiel des tubercules se retrouve dans la catégorie de poids 0-25 g. Par la suite, au fur et à mesure que le poids des tubercules augmente, les catégories de poids plus élevées ressortent.

L'analyse statistique a permis d'identifier des différences entre les cinq traitements et ces différences sont présentées à l'aide de contrastes. Ainsi, les comparaisons effectuées entre les traitements nous renseignent sur la probabilité d'avoir des tubercules avec un poids plus petit pour un traitement donné comparativement à un autre (seuil d'au moins $P = 0,1$).

En 2009, pour le cultivar Russet B., dès le début de la saison et jusqu'à la dernière période, la probabilité d'avoir des tubercules plus petits était de 2,3 à 4,7 fois plus élevée dans le traitement B ($I_{65\%}-N_0$), qui est non fertilisé en N, que dans le traitement E ($I_{65\%}-N$), qui a la même consigne d'irrigation, mais qui a été fertilisé en N. Une situation similaire a été mesurée pour le cultivar Norland. Ainsi, bien que les différences significatives aient pris plus de temps à se manifester, au 18 septembre, la probabilité de récolter des tubercules plus petits dans le traitement B ($I_{65\%}-N_0$) était 3,2 fois plus élevée que dans le traitement E ($I_{65\%}-N$) (Figure 18). Enfin, seulement pour la 'Russet B.', les probabilités d'avoir des tubercules plus petits dans le traitement A (I_0-N_0), soit celui sans apport d'N ou d'eau par l'irrigation, sont de 1,6 à 3,9 fois plus élevées que pour le traitement C (I_0-N), qui est non irrigué, mais qui reçoit des apports en N. Ces observations vont de pair avec les mesures de la qualité des tubercules qui seront présentées au Tableau 5, à savoir que la proportion de tubercules non vendables est plus élevée dans les traitements sans apport en N.

En 2010, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements pour le cultivar Norland, quelle que soit la date de récolte, la consigne d'irrigation ou de fertilisation N (Figure 19). Par contre, pour le cultivar Russet B., des différences significatives ont été observées le 5 août et à la dernière récolte, effectuée le 18 octobre (Figure 20). Au 5 août, la probabilité d'observer des tubercules plus petits était 1,9 fois plus élevée dans le traitement B ($I_{65\%}-N_0$) que le E ($I_{65\%}-N$). Cette probabilité était de 2,1 pour le traitement C (I_0-N), qui est non irrigué, lorsque comparé avec les 2 traitements irrigués D ($I_{65\%}-N$) et E ($I_{65\%}-N$). Toutefois, au terme de la saison, les différences observées se limitent aux traitements B et E, où la probabilité de récolter des petits tubercules dans le traitement B, sans apport en N, est 2,4 fois plus élevée. Cette situation pourrait s'expliquer par une participation plus importante des apports en eau par les précipitations après le 5 août. En effet, pour la période précédant le 5 août, entre 75 et 93 % du nombre total d'épisodes d'irrigation, selon le traitement, était déjà complété (Tableau 4). Ainsi, les différences de calibre observées entre les traitements irrigués et non irrigués ont pu s'amenuiser par la suite avec les précipitations.

Maintenant, comment expliquer la tendance observée à la Figure 16 B où le poids total en tubercules pour le traitement E ($I_{65\%}-N$) semble plus élevé. Si on regarde le nombre de tubercules moyen par plant, toutes catégories confondues, il est respectivement de 12, 12,5 et 14,5 pour les traitements C, D et E pour le 3 septembre et respectivement de 11, 12,5 et 14,6 pour le 18 octobre. Ainsi, il est possible que l'irrigation ait joué un rôle favorable à la production d'un nombre supérieur de tubercules en début de saison. Toutefois, il est probable que le nombre plus

important d'épisodes d'irrigation dans le traitement E ait occasionné une plus grande pression sur la perte des nitrates par le lessivage. Conséquemment, les plants auraient manqué d'azote pour mener à terme le développement d'un plus grand nombre de tubercules. Par conséquent, une proportion des tubercules est restées « coincés » dans les catégories médianes de poids (50 à 125 g). D'autant plus que, tant pour la saison 2009 que celle de 2010, l'impact des apports en azote dans le développement des tubercules semble davantage probant que celui des apports en eau par l'irrigation (B vs E et A vs C).

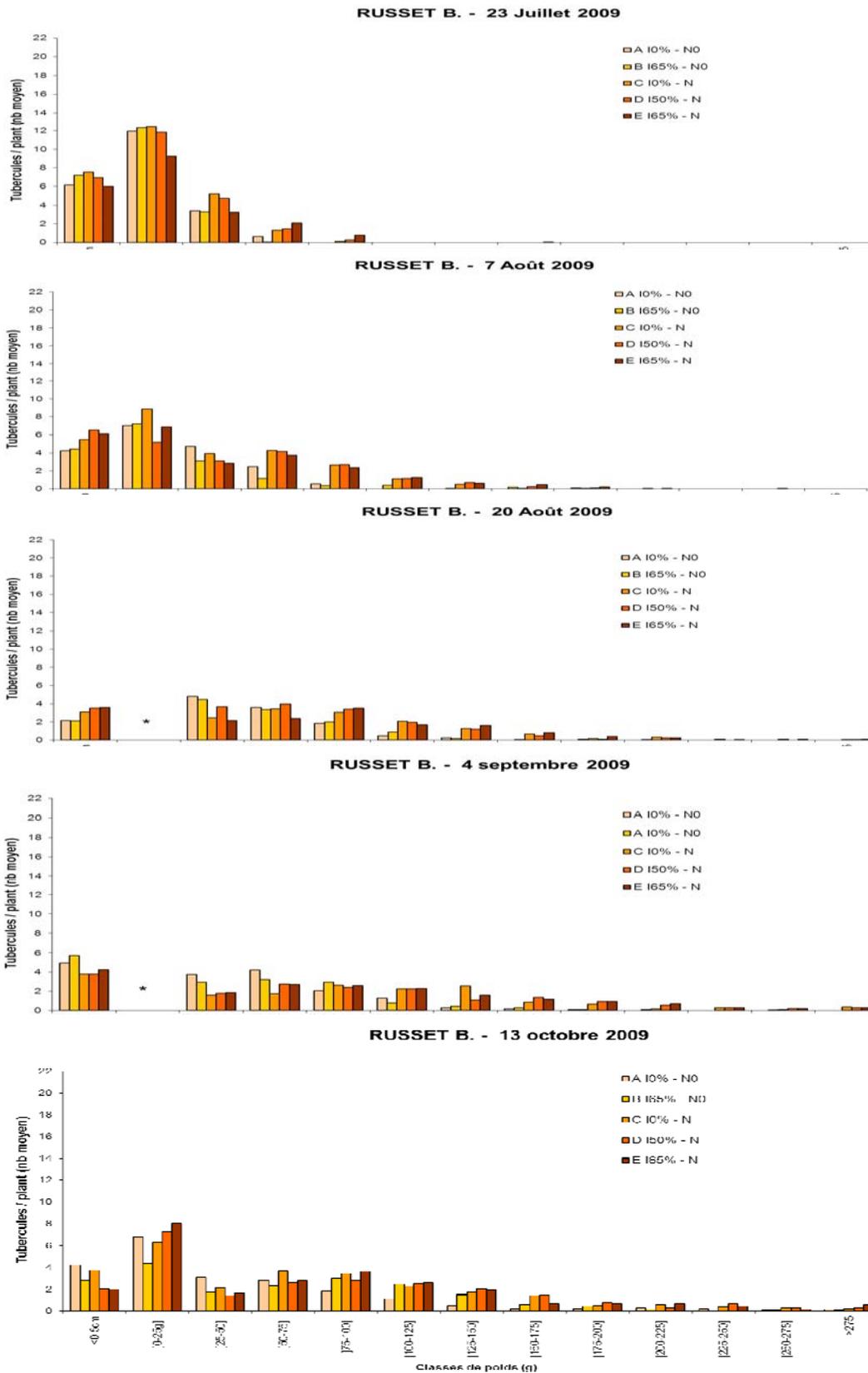
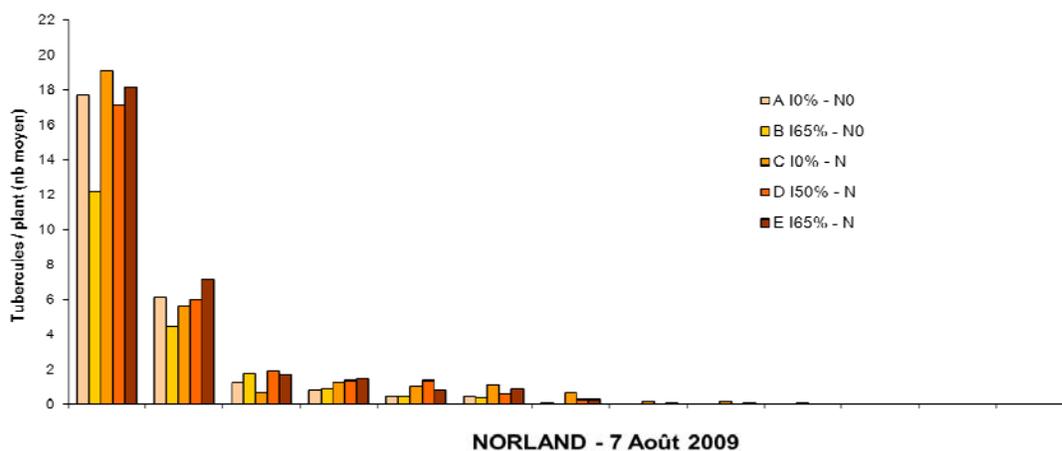
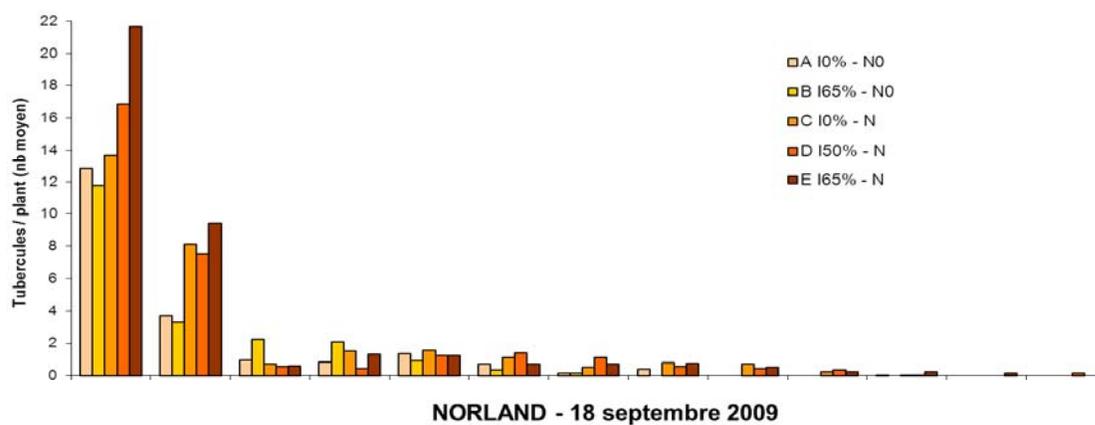


Figure 17. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids et le traitement en 2009 ('Russet B.'). * Données manquantes

NORLAND - 23 Juillet 2009



NORLAND - 7 Août 2009



NORLAND - 18 septembre 2009

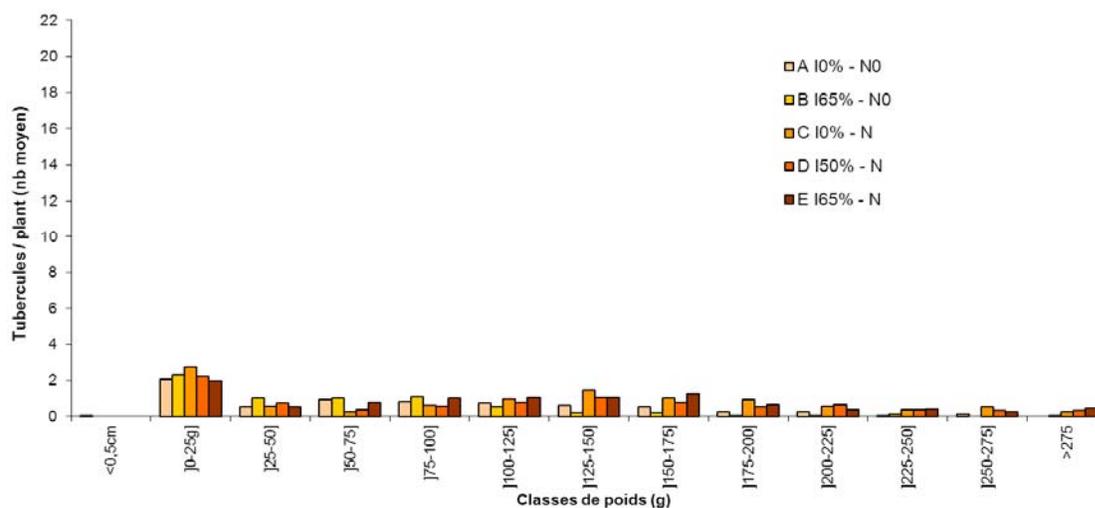


Figure 18. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids et le traitement en 2009 ('Norland').

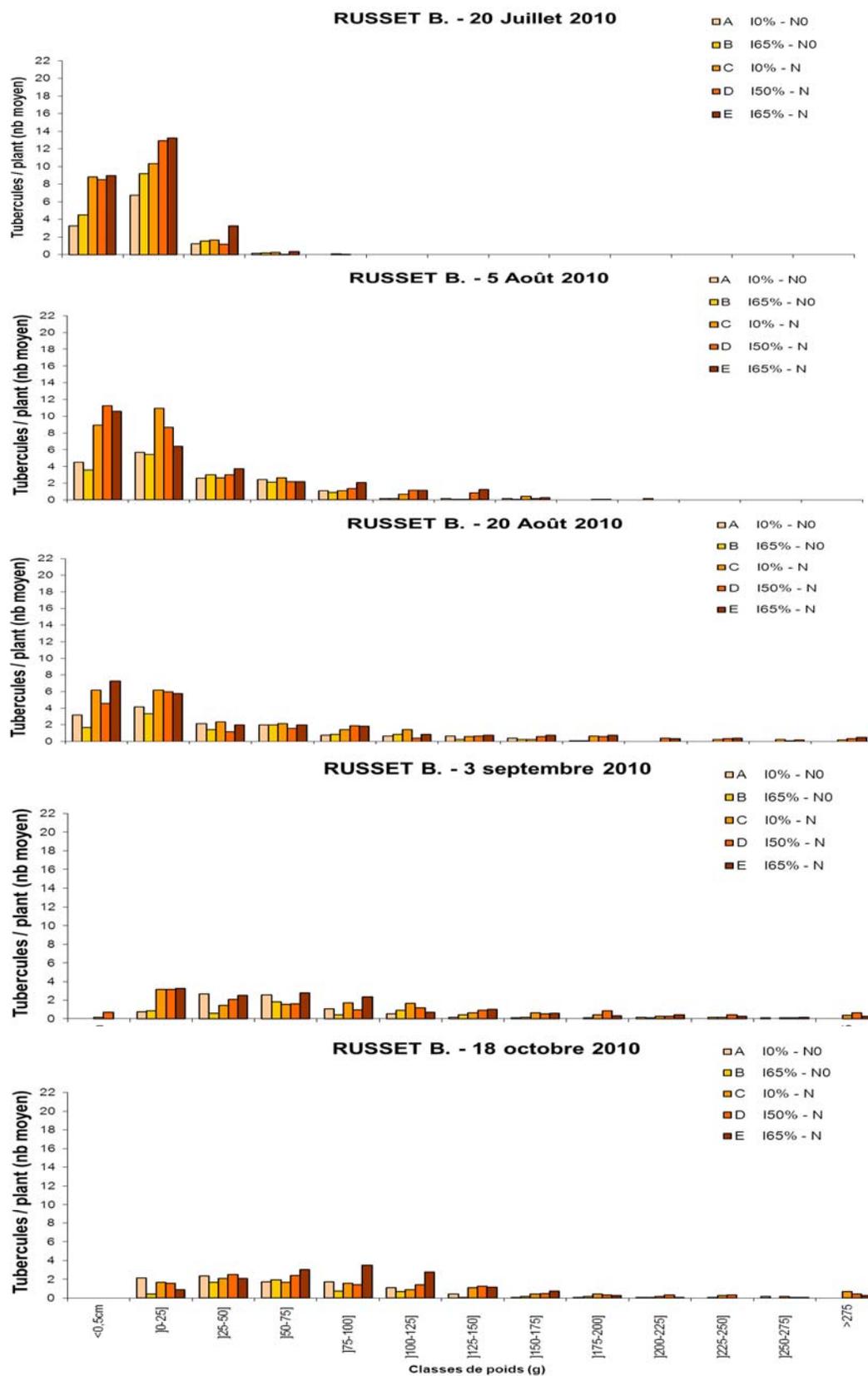


Figure 19. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids et le traitement en 2010 (‘Russet B.’).

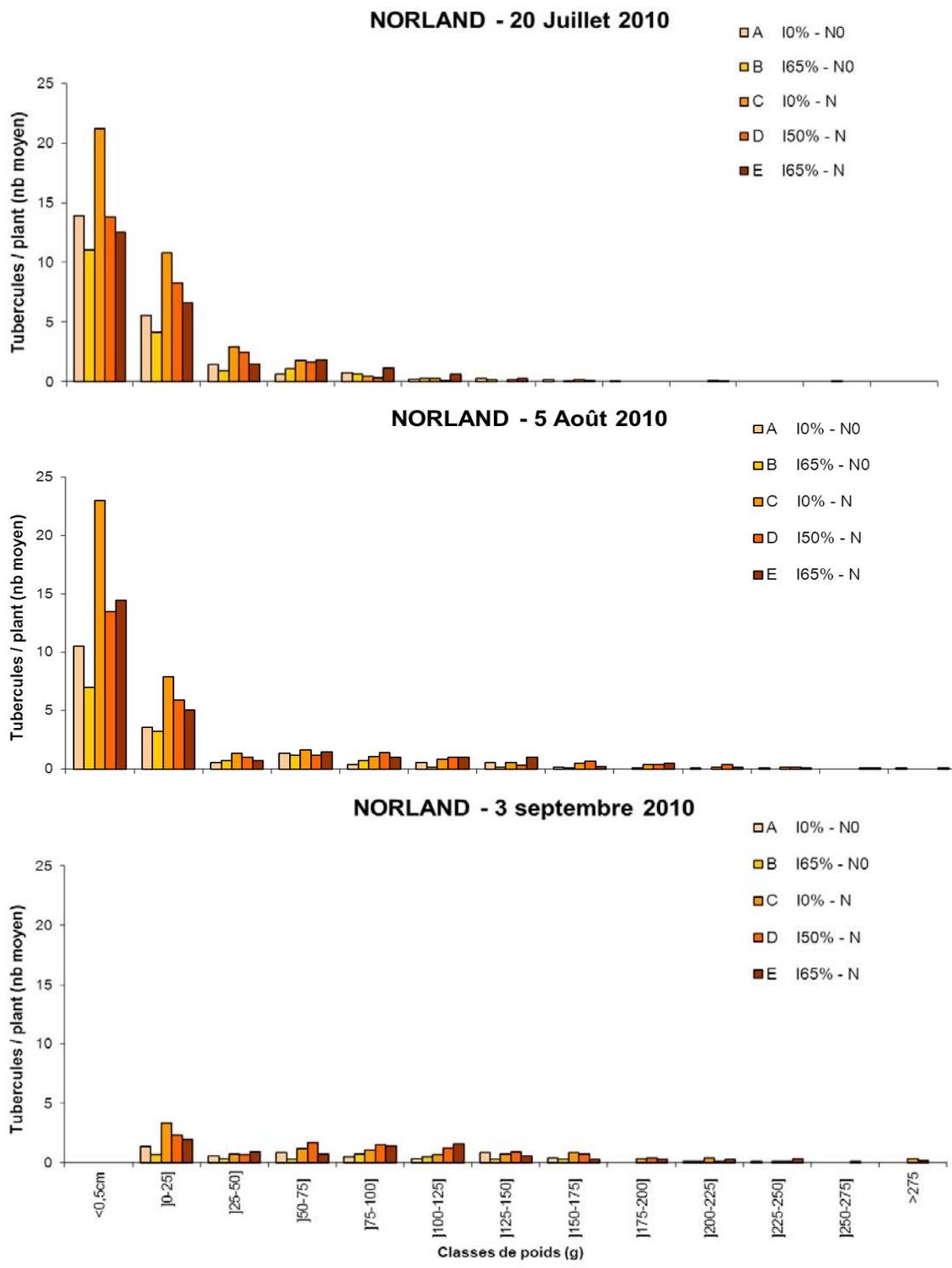


Figure 20. Suivi périodique du nombre moyen de tubercules par plant selon le poids et le traitement en 2010 (‘Norland’).

4.1.2.2 Les rendements commercialisables

Tel qu'attendu, les résultats révèlent que la fertilisation en N a eu un impact majeur sur la production vendable des deux cultivars à chacune des années (Figure 21 et Figure 22), démontrant que le site d'étude était adéquat pour étudier les apports de N. Ainsi, en 2009, les parcelles non irriguées fertilisées en N I_0-N ont produit 22,5 et 18,5 t ha⁻¹ de plus de tubercules vendables que les parcelles non irriguées et non fertilisées I_0-N_0 pour les cultivars Norland et Russet B., respectivement. En 2010, le bénéfice des apports d'engrais azotés était encore très significatif, mais moins élevé, probablement à cause des conditions climatiques qui étaient très favorables à l'activité biologique des sols. En effet, le printemps a débuté environ deux semaines avant la normale et la température des sols s'est élevée rapidement. Celle-ci a ensuite pu se maintenir puisque l'été a été marqué par un temps chaud. Les différences de production vendable entre les parcelles non irriguées fertilisées I_0-N et les parcelles non irriguées et non fertilisées I_0-N_0 se sont donc abaissées à 16,8 et 9,9 t ha⁻¹ pour les cultivars Norland et Russet B., respectivement, ce qui est même très significatif.

L'impact de l'irrigation a été plus modulé. Dans le cas des plants fertilisés, la récolte de 2009 démontre que l'irrigation n'a pas eu d'impact significatif sur les rendements vendables des deux cultivars, bien que le rendement des plants $I_{50\%}-N$ de 'Russet B.' se soit légèrement démarqué. Les rendements des plants fertilisés sont donc statistiquement similaires et présentent une valeur moyenne de 39,3 et 35,8 t ha⁻¹ pour les cultivars Norland et Russet B., respectivement. Il s'agit d'un excellent rendement, au-dessus de la moyenne provinciale de 29,5 t ha⁻¹ (Statistiques Canada, 2011). Il faut toutefois se rappeler que la saison 2009 n'a pas connu de grande période de déficit hydrique.

En 2010, une situation différente a été observée. Ainsi, dans le cas du cultivar Norland (Figure 21), l'irrigation à 65 % de la RU a entraîné une baisse du rendement vendable d'environ 15 % ($P = 0,07$), comparativement aux autres parcelles fertilisées (I_0-N et $I_{50\%}-N$). Le rendement des parcelles était donc de 5 t ha⁻¹ plus bas et se retrouvait sous la moyenne provinciale de 2010 de 30,4 t ha⁻¹ (Statistiques Canada, 2011). De plus, l'irrigation à 50 % de la RU, sans nuire, n'a pas non plus procuré de bénéfice au niveau du rendement vendable. Il faut toutefois considérer que ce cultivar hâtif a eu moins de temps pour tirer profit d'une irrigation qui serait à une consigne adéquate, comme cela semble être le cas pour le cultivar Russet B. avec la consigne à 50 % de la RU (Figure 22). En effet, dans les parcelles du traitement $I_{50\%}-N$, les dernières irrigations du cultivar Norland ont été effectuées le 30 juillet pour une récolte le 1^{er} septembre, tandis que dans le cas du cultivar tardif Russet B., des irrigations ont eu lieu jusqu'au 2 septembre, pour une récolte le 18 octobre. Ainsi, dans le cas de la 'Russet B.', un rendement vendable supérieur a été atteint avec une irrigation à 50 % de la RU ($P < 0,05$), comparativement aux parcelles non irriguées I_0-N . C'est donc 4,6 t ha⁻¹ vendables de plus qui ont été récoltées. Par contre, une irrigation plus intensive à 65 % de la RU n'a pas apporté de bénéfice additionnel, avec un rendement qui n'est pas statistiquement ($P = 0,18$) plus élevé que celui des parcelles fertilisées non irriguées I_0-N . Par ailleurs, aucun des traitements n'a rejoint la moyenne provinciale de 30,4 t ha⁻¹ (Statistiques Canada, 2011). Cette moyenne ne tient cependant pas compte des types de cultivar. De plus, cela n'est pas dû à l'irrigation en soit puisque même le traitement non irrigué fertilisé I_0-N est dans cette situation.

Dans le cas des parcelles non fertilisées, l'irrigation à 65 % de la RU semble globalement avoir eu un impact négatif sur les rendements (Figure 21 et Figure 22). Dans le cas du cultivar Norland,

cet effet est significatif les deux années. Ainsi, les plants $I_{65\%}\text{-}N_0$ ont produit 6,3 et 7,3 t ha⁻¹ de moins de tubercules vendables que les parcelles $I_0\text{-}N_0$ en 2009 et 2010, respectivement. Pour le cultivar Russet B., les différences de production, quoique non significatives à $P < 0,05$, vont dans le même sens avec 2,4 et 3,0 t ha⁻¹ moins de tubercules vendables pour les parcelles $I_{65\%}\text{-}N_0$, comparativement aux parcelles $I_0\text{-}N_0$, en 2009 et 2010, respectivement. Cet impact négatif pourrait s'expliquer par le faible couvert végétal offert par les plants plus petits de ce traitement qui offraient une protection réduite au sol contre l'eau aspergée. Le sol était davantage exposé aux rayons solaires et son contenu en eau s'évaporait plus rapidement, augmentant ainsi la tension. La consigne d'irrigation était ainsi fréquemment atteinte. Cette situation a probablement créé une pression accrue sur le risque de lessivage des nitrates. Par exemple, en 2010, le prélèvement en N des plants $I_{65\%}\text{-}N_0$ des deux cultivars est effectivement significativement plus bas, de près de 40 %, que celui des plants $I_0\text{-}N_0$ (Tableaux 7 et 9).

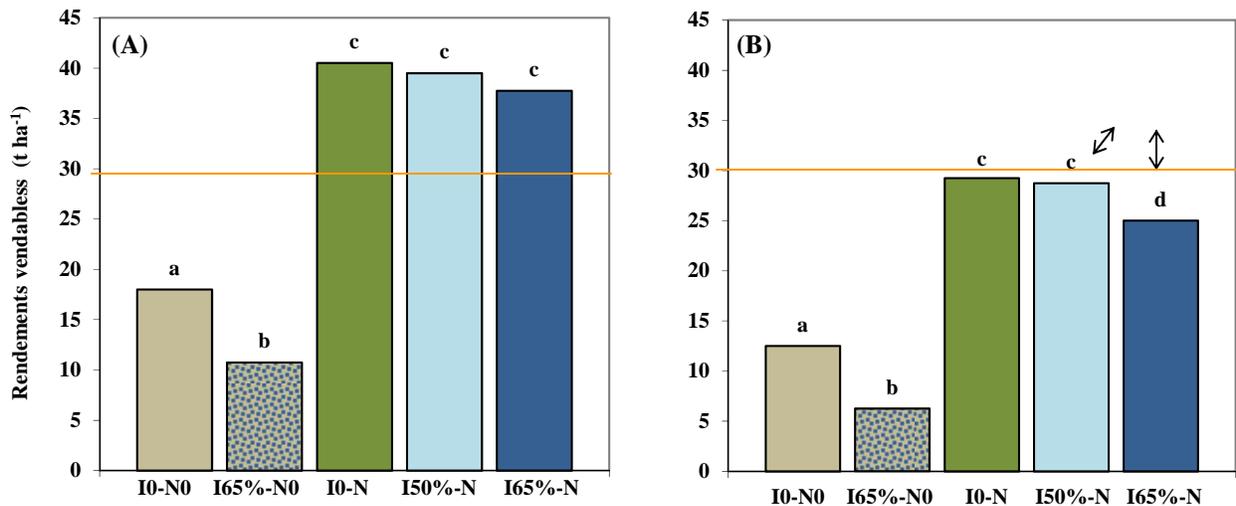


Figure 21. Rendements commercialisables en pommes de terre pour la 'Norland' en 2009 (A) et 2010 (B) à la récolte. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire. La ligne jaune indique la moyenne provinciale.

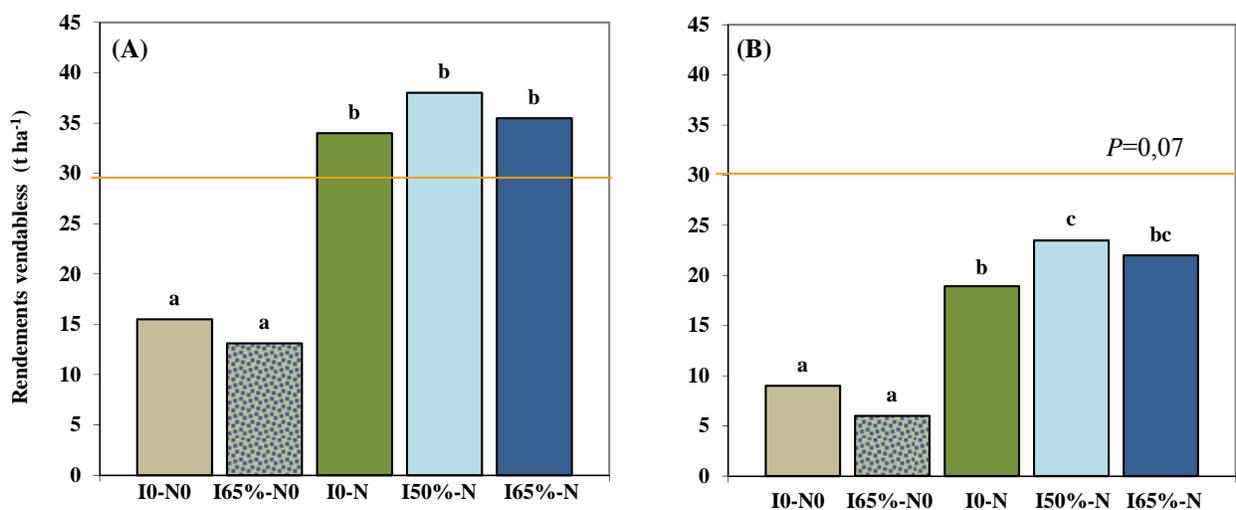


Figure 22. Rendements commercialisables en pommes de terre pour la 'Russet B.' en 2009 (A) et 2010 (B) à la récolte. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire. La ligne jaune indique la moyenne provinciale.

En ce qui a trait à la qualité de la récolte, aucun impact, ni de la fertilisation, ni de l'irrigation, n'a été mesuré sur le poids spécifique (Tableau 5). En ce qui concerne les maladies, aucun effet n'a également été mesuré en 2009. Toutefois, en 2010, une baisse du taux de gale est rapportée pour le cultivar Norland en présence d'irrigation, que les plants soient ou non fertilisés. Par contre, cet impact ne se mesure pas pour la 'Russet B'. qui est plutôt résistante à la gale.

Tableau 5. Mesure de la qualité des tubercules pour 'Norland' et 'Russet B.' en 2009 et 2010.

Cultivars	Années	Irrigation (% RU)	Fertilisation (kg N ha ⁻¹)	Rejets ^{††} (%)	Moyenne [†] (%)	Grosse [†] (%)	Poids spécifique	Indices Gale Rhizoctonie	
'Norland'	2009	Aucune	0	10 ^{ab}	55 ^a	8 ^a	1,078 ^a	0,050 ^a	0,591 ^a
		65	0	17 ^a	53 ^b	2 ^a	1,082 ^a	0,170 ^a	0,463 ^a
	2010	Aucune	150	4 ^b	57 ^c	10 ^b	1,078 ^a	0,070 ^a	0,431 ^a
		50	150	5 ^{ab}	57 ^c	11 ^b	1,080 ^a	0,160 ^a	0,270 ^a
		65	150	4 ^b	55 ^c	13 ^b	1,079 ^a	0,090 ^a	0,275 ^a
	2009	Aucune	0	15 ^a	55 ^a	4 ^a	1,064 ^a	0,750 ^a	1,404 ^a
		65	0	24 ^a	50 ^b	0 ^b	1,063 ^a	0,070 ^b	1,400 ^a
		Aucune	150	10 ^b	54 ^{cc}	9 ^c	1,062 ^a	0,700 ^a	0,541 ^b
		50	150	11 ^b	57 ^{dc}	6 ^{ac}	1,063 ^a	0,330 ^b	1,012 ^a
		65	150	10 ^a	54 ^e	10 ^c	1,063 ^a	0,260 ^b	0,530 ^b
'Russet Burbank'	2009	Aucune	0	27 ^a	36 ^a	1 ^a	1,094 ^a	0,000 ^a	0,473 ^a
		65	0	22 ^{ab}	33 ^a	1 ^a	1,095 ^a	0,010 ^a	0,420 ^a
	2010	Aucune	150	11 ^b	43 ^b	0 ^a	1,093 ^a	0,000 ^a	0,856 ^a
		50	150	10 ^b	44 ^b	1 ^a	1,091 ^a	0,000 ^a	0,700 ^a
		65	150	11 ^b	43 ^b	2 ^a	1,096 ^a	0,000 ^a	0,576 ^a
2010	Aucune	0	32 ^{ab}	41 ^a	0 ^a	1,072 ^a	0,090 ^a	1,308 ^a	
	65	0	34 ^a	39 ^a	1 ^a	1,070 ^a	0,040 ^a	0,992 ^{ab}	
	Aucune	200	25 ^b	40 ^b	9 ^b	1,075 ^a	0,070 ^a	1,336 ^a	
	50	200	19 ^{ab}	46 ^c	6 ^b	1,072 ^a	0,020 ^a	0,999 ^{ab}	
	65	200	24 ^{cb}	49 ^c	1 ^{ab}	1,075 ^a	0,110 ^a	0,717 ^b	

[†] Pourcentage de rejets selon le rendement total.

^{††} Les valeurs ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.

4.1.2.3 Densité racinaire

La densité racinaire a été mesurée lors de la 2^e saison, à la mi-août. Les analyses statistiques ayant trait à cette mesure (longueur des racines en cm par cm³ de sol) ont été réalisées selon le traitement (cultivar, irrigation et apport en N) et la zone dans la butte de sol.

En ce qui a trait au cultivar Russet B., il existe des différences significatives pour les facteurs Traitement, Zone, ainsi que pour l'interaction Traitement x Zone à $P = 0,0186$, $< 0,001$ et $0,0011$, respectivement. Par contre, pour le cultivar Norland, il n'existe aucune différence significative (n.s) pour le facteur Traitement. Toutefois, il en existe pour le facteur Zone et pour l'interaction Traitement x Zone à $P < 0,001$ et $0,0060$, respectivement. La présence d'une interaction entre les traitements et les zones indique que la densité racinaire mesurée pour une zone donnée est différente selon le traitement.

La Figure 23 et la Figure 24 présentent la densité racinaire mesurée dans chacune des 12 zones pour les cultivars Russet B. et Norland et ce, tous traitements confondus. Il est alors intéressant de constater que la densité racinaire mesurée dans la partie supérieure de la butte (zones 7 à 12) est plus grande que celle mesurée dans la partie inférieure (zones 1 à 6) (contraste significatif à $P < 0,001$ pour les deux cultivars). De plus, il semble y avoir un gradient « Est-Ouest » en faveur de la moitié de la butte qui est orientée vers l'Est (zones 1, 2, 3, 7, 8 et 9). Compte tenu de ces observations et du nombre important de comparaisons qu'aurait générées la prise en charge individuelle des 12 zones, ces dernières ont été regroupées en zones « inférieure », « supérieure », « Est » et « Ouest ».

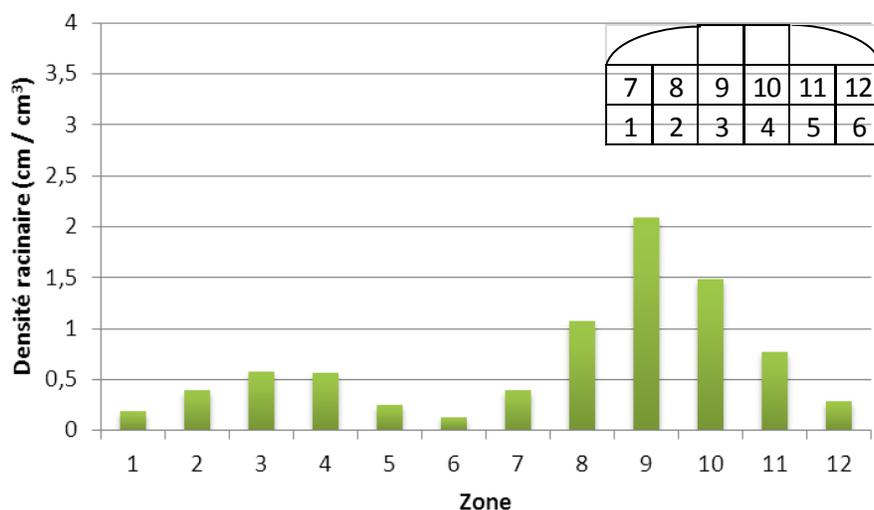


Figure 23. Distribution de la densité racinaire moyenne (cm de racine par cm³ de sol) selon la zone (1 à 12) pour le cultivar Russet B. (tous traitements confondus), août 2010.

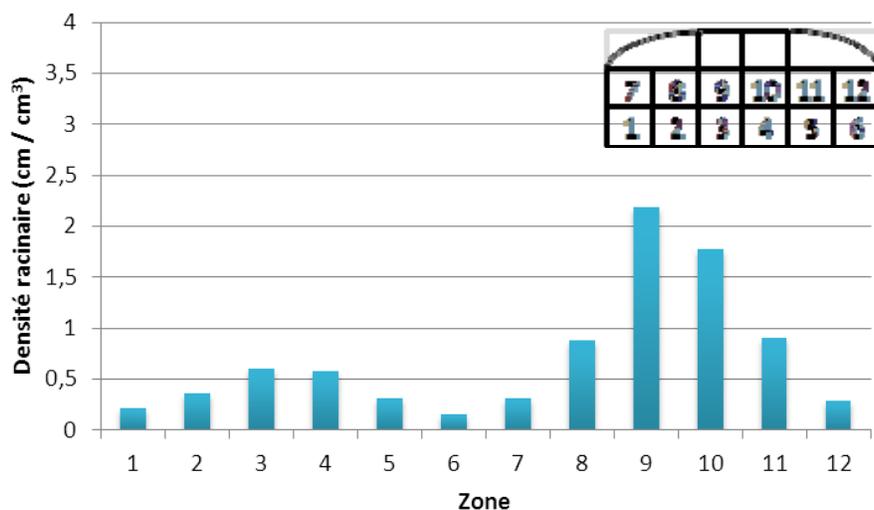


Figure 24. Distribution de la densité racinaire moyenne (cm de racine par cm³ de sol) selon la zone (1 à 12) pour le cultivar Norland (tous traitements confondus), août 2010.

En ce qui a trait à la Russet B., pour les comparaisons des zones supérieures et inférieures, la densité racinaire mesurée dans le traitement C, non irrigué mais fertilisé en N (I₀-N) a tendance à être la plus faible pour les deux zones de la butte (Figure 25 et Figure 26). Par contre, le traitement D, irrigué à 50 % de la RU (I_{50%}-N) a tendance à produire davantage de racines que les deux autres traitements fertilisés en N (C et E). Pour ce qui est du traitement témoin non fertilisé

et non irrigué I₀-N₀ (A) sa densité racinaire est comparable à celle des traitements qui présentent la densité racinaire la plus élevée.

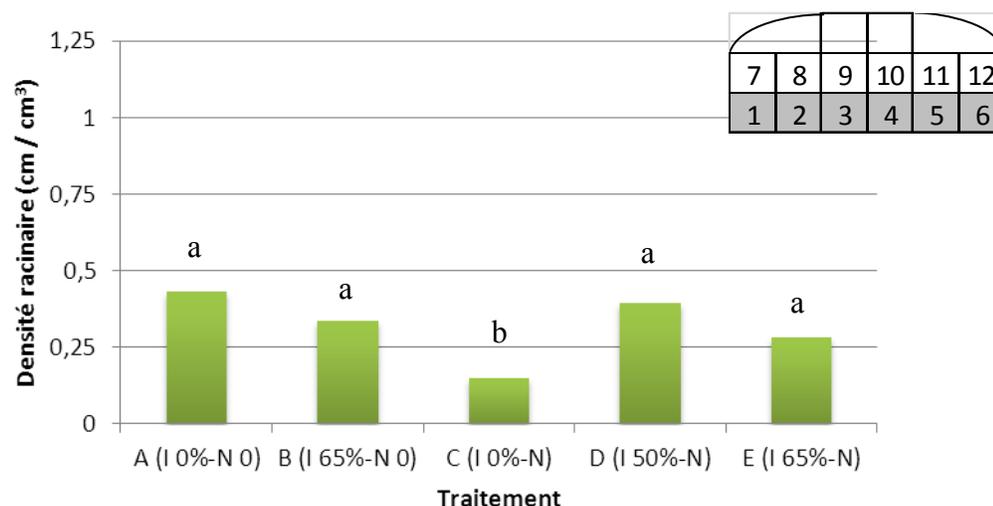


Figure 25. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm³ de sol) de la zone « inférieure » pour le cultivar Russet B. ($P \leq 0,1$).

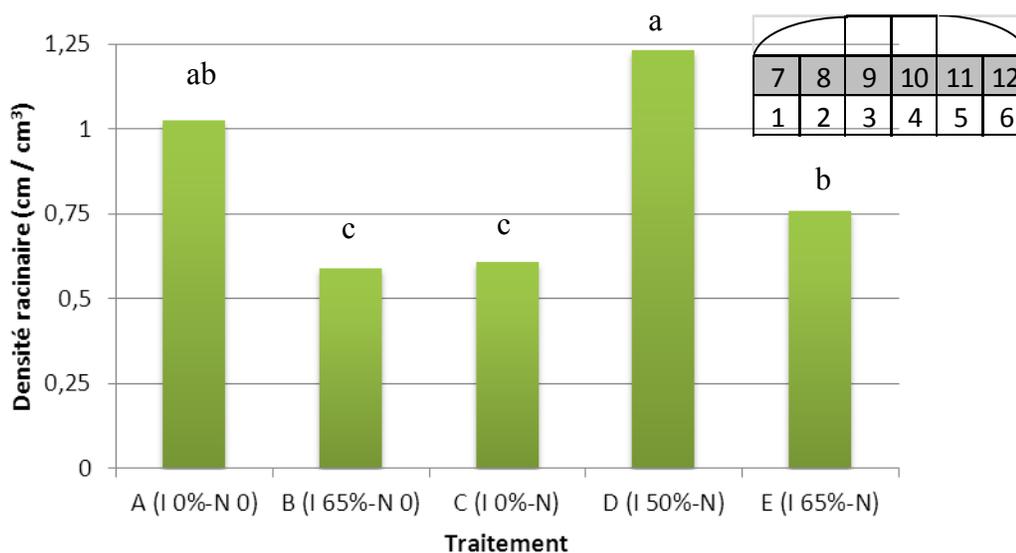


Figure 26. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm³ de sol) de la zone « supérieure » pour le cultivar Russet B. ($P \leq 0,1$).

Pour ce qui est de la comparaison des zones « Est-Ouest », c'est encore une fois le traitement D irrigué à 50 % de la RU qui présente la densité racinaire la plus élevée des trois traitements fertilisés en N (C, D et E) (Figure 27 et Figure 28). De même, une fois de plus, le traitement A, qui ne reçoit aucun apport en N et en eau provenant de l'irrigation, est comparable aux traitements qui présentent la densité racinaire la plus élevée.

7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6

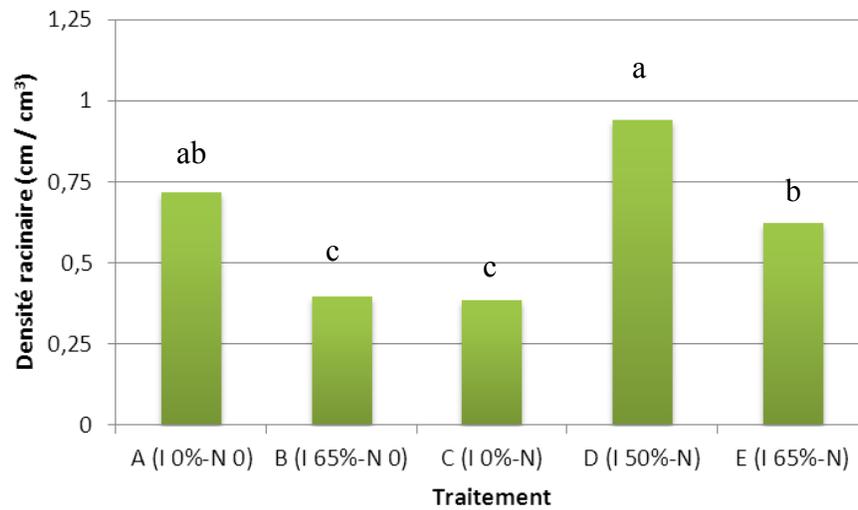


Figure 27. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm³ de sol) de la zone « Est » pour le cultivar Russet B. ($P \leq 0,1$).

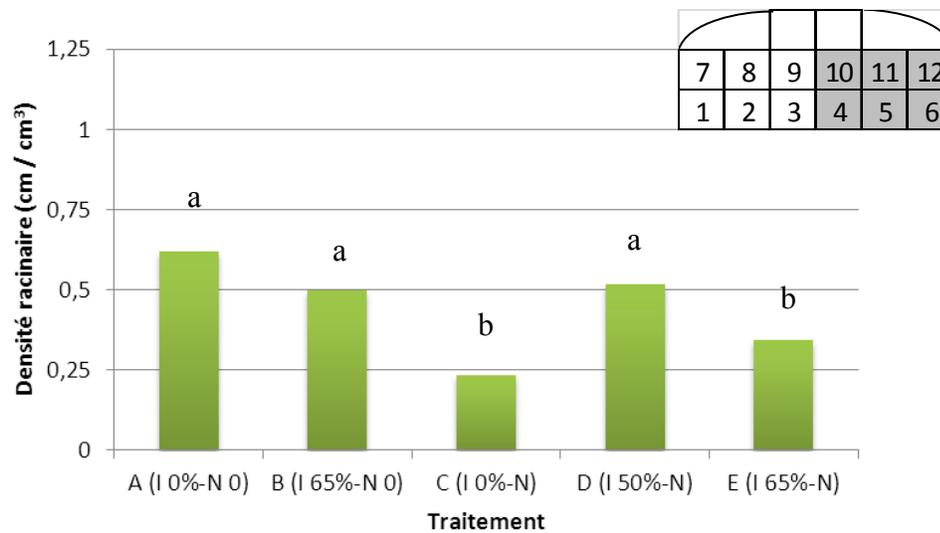


Figure 28. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm³ de sol) des zones « Ouest » pour le cultivar Russet B. ($P \leq 0,1$).

Pour ce qui est du cultivar Norland, comme pour le cultivar Russet B., la densité racinaire mesurée dans la zone inférieure de la butte est plus élevée pour le traitement irrigué à 50 % de la RU (D) que celle des autres traitements recevant de l'azote (C et E) (Figure 29). Par contre, aucune différence significative (n.s.) n'a été observée entre les traitements en ce qui a trait à la densité racinaire dans la zone supérieure de la butte (Figure 30).

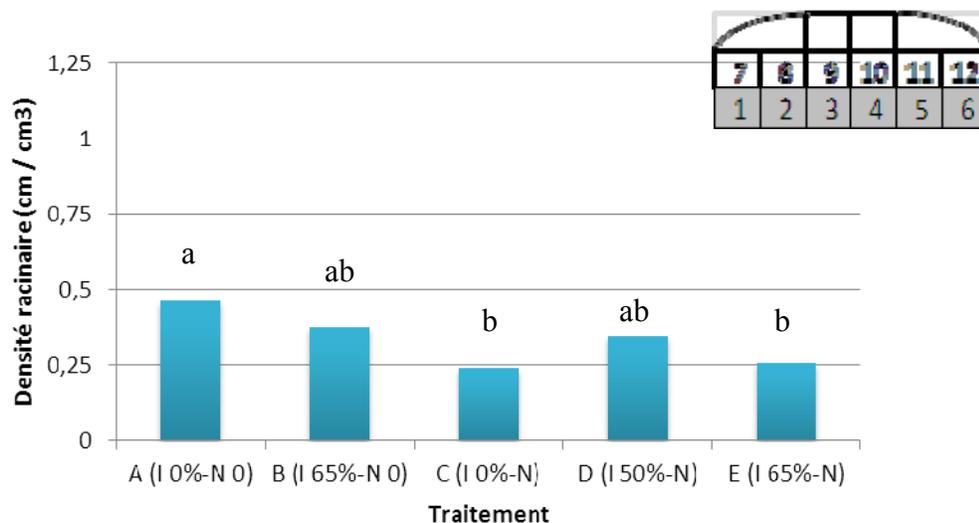


Figure 29. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm³ de sol) de la zone « inférieure » pour le cultivar Norland ($P \leq 0,1$).

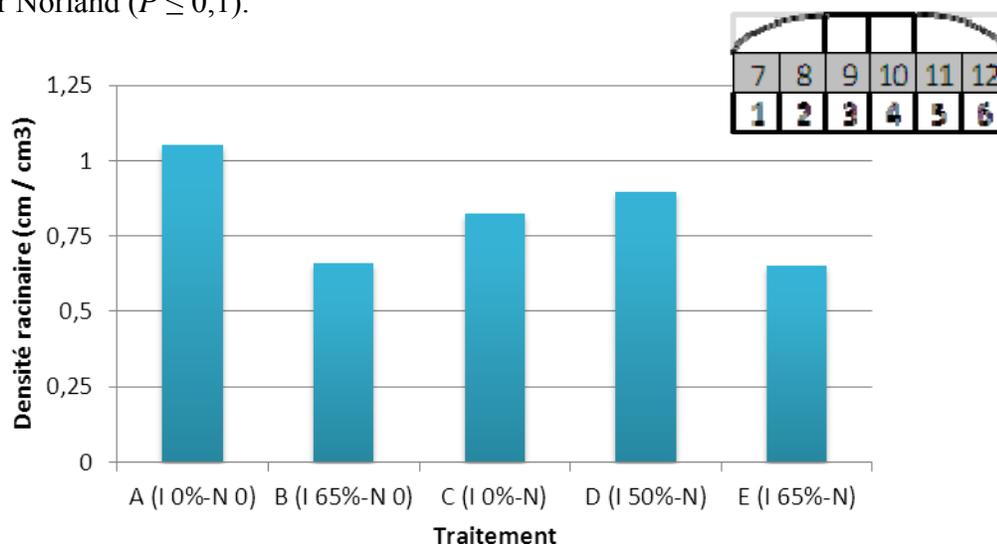


Figure 30. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm³ de sol) de la zone « supérieure » pour le cultivar Norland (n.s.).

Dans le cas des comparaisons Est-Ouest, la densité racinaire mesurée dans les zones « Est » du traitement A, qui ne reçoit aucune fertilisation azotée et apport d'eau par l'irrigation, est significativement supérieure à celles des autres traitements (Figure 31). En ce qui a trait aux zones « Ouest », les densités mesurées sont comparables pour la plupart des traitements. Toutefois, une densité significativement supérieure a été mesurée pour le traitement D, irrigué à 50 % de la RU, lorsque comparé au traitement E, irrigué à 65 % de la RU (Figure 32).

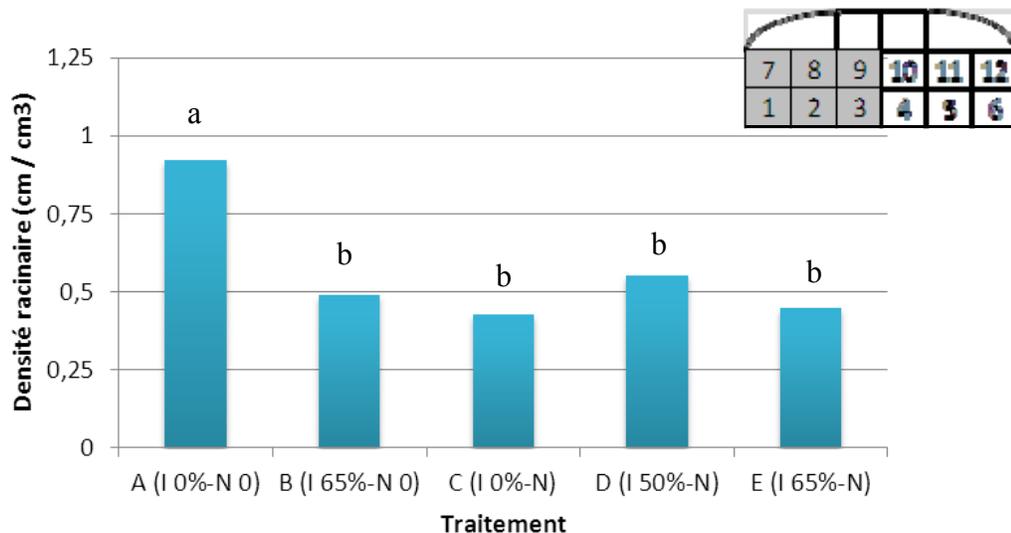


Figure 31. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm³ de sol) des zones « Est » pour le cultivar Norland ($P \leq 0,1$).

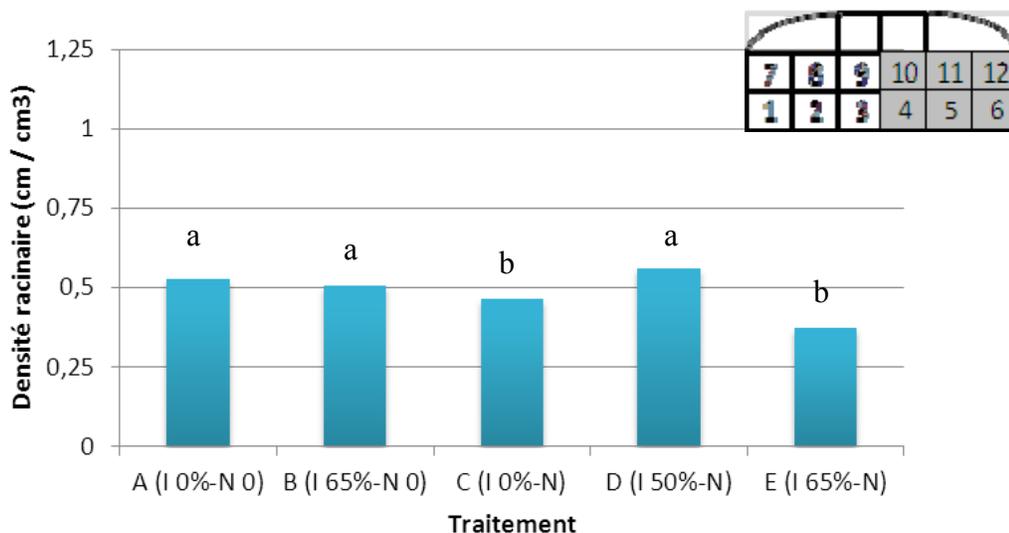


Figure 32. Densité racinaire moyenne (cm de racine par cm³ de sol) des zones « Ouest » pour le cultivar Norland ($P \leq 0,1$).

En résumé, la densité racinaire et la distribution de celle-ci ont globalement été influencées par les traitements et, possiblement, par l'orientation des buttes par rapport au soleil. Quoique ces différences, ou tendances, observées soient davantage marquées pour le cultivar Russet B., elles sont généralement présentes pour le cultivar Norland. La première de ces différences qui ressort concerne la comparaison des traitements avec apports en N (C, D et E) où celui irrigué à 50 % de la RU (D) présente généralement une plus grande densité racinaire, peu importe la base de comparaison (supérieure, inférieure, Est ou Ouest). Cette densité racinaire plus élevée est possiblement un avantage pour les plants lorsque les ressources en eau et en N sont disponibles. Par exemple, une densité plus grande en profondeur indique que ces plants ont possiblement colonisé cette zone avant les autres, ce qui leur donne accès plus rapidement à une réserve plus grande en nutriments et en eau. De même, une densité racinaire plus élevée dans la zone supérieure pourrait être particulièrement profitable pour des plants dans la mesure où l'activité microbiologique impliquée dans le cyclage des éléments nutritifs y est possiblement la plus active. Cette hypothèse est en partie appuyée par la teneur en N_{tot} dans la 4^e feuille des plants au stade floraison, présentée à la Figure 9. En effet, la teneur en N_{tot} de la 4^e feuille des plants du traitement D ($I_{50\%}\text{-N}$) est grandement supérieure à celle des plants E ($I_{65\%}\text{-N}$) et tend à être plus élevée que celle des plants C non irrigués ($I_0\text{-N}$). De plus, la mesure de masse sèche des plants présentée à la Figure 13 pour la même date révèle que les plants du traitement D ($I_{50\%}\text{-N}$) ont déjà à cette période une masse sèche plus grande, comparativement à celle des plants E ($I_{65\%}\text{-N}$) ($P = 0,04$) et C non irrigués ($I_0\text{-N}$) ($P = 0,07$).

La deuxième différence notable concerne la densité racinaire mesurée pour le traitement A ($I_0\text{-N}_0$), parmi les plus élevées malgré l'absence d'apport en N et en eau provenant de l'irrigation. Cet état est possiblement attribuable à la plus grande rareté de ces ressources qui a requis de la plante un investissement plus grand au niveau racinaire pour tenter de combler les besoins en eau et en N. En effet, les plants de ce traitement ne peuvent compter que sur les nitrates produits par l'activité microbiologique du sol et les apports naturels d'eau. Cette difficulté à s'accaparer les ressources au taux de suffisance est d'ailleurs illustrée par le plus faible développement et le statut nutritionnel inférieur de ces plants, comparativement aux plants fertilisés en N (Figures 8, 9, 12 et 13). Par contre, les plants non fertilisés (B), mais irrigués à 65 % de la RU, ne présentent pas une telle compensation racinaire, probablement parce que l'irrigation a occasionné une pression telle sur la perte des nitrates par le lessivage que les plants ont manqué de ressources pour se développer davantage. Leur développement et leur statut nutritionnel sont d'ailleurs les plus bas. Les plants du traitement C, fertilisés en N mais non irrigués, présentent aussi une densité racinaire dans les plus faibles. Par contre, puisque leur développement et statut nutritionnel ne sont pas déficients, ce développement moins grand des racines est probablement dû au fait que le N est disponible près des plants. En effet, en absence d'irrigation les nitrates produits dans la strate utile de sol ont moins de risque d'être lessivés en dehors de la zone racinaire.

Enfin, la troisième différence marquée concerne le gradient Est-Ouest qui est en faveur de l'Est, possiblement à cause de la position de ce regroupement de zones par rapport à la révolution du soleil. La première hypothèse considérait la position de ces zones par rapport au gicleur, qui est situé au centre de la parcelle. Toutefois, comme ce gradient s'observe aussi avec les deux traitements non irrigués A et C, cette hypothèse a été rejetée. En effet, comme l'apport en eau provient du centre de la parcelle et que les tranches de sol (racines) ont été prélevées aux mêmes endroits dans chacune des parcelles, les deux côtés de la butte ne sont possiblement pas alimentés de façon identique, ce qui aurait pu avantager un des côtés. L'hypothèse de l'orientation de l'ensoleillement demeure donc la plus plausible. Il y aurait peut-être sur la base de cette

information une réflexion à faire par rapport au fractionnement de l'engrais azoté qui se fait actuellement à parts égales de chaque côté des plants.

4.1.3 Utilisation de l'azote par la culture et part non utilisée des engrais azotés

Premièrement, l'intervalle de CUA mesuré au cours de ce projet (Tableau 6 au Tableau 9) est tout à fait dans les valeurs de référence et indique que lors de cette étude, les plants ont pu réaliser des prélèvements en N comparables avec ce qui est observé habituellement au Québec pour cette culture. En effet, en moyenne au Québec, l'utilisation du N des engrais par les cultures est de l'ordre de 50 % lors de l'année d'application (N'Dayegamiye et Seydoux, 2008). Pour la culture de la pomme de terre (feuillage et tubercules), le CUA est rarement de plus de 60 % et peut s'abaisser dans les 30 % lorsque les conditions climatiques ou de sol sont défavorables (Tran et coll., 1992; CRAAQ, 2003). Diverses études réalisées dans cette culture, dans la même région et durant les mêmes années que la présente étude, rapportent aussi des CUA du N d'un même ordre de grandeur (Boivin et Landry, 2009; Landry, 2011).

Deuxièmement, le suivi des prélèvements en N du traitement témoin I_0-N permet de mieux caractériser l'évolution de l'acquisition en N des plants. Ainsi, l'analyse des prélèvements en N révèle, pour les deux cultivars les deux années, que dès la floraison les plants ont déjà prélevé en moyenne un peu plus de la moitié de tout le N qui sera prélevé sur la saison (Tableau 6 au Tableau 9). Si on s'attarde uniquement au N qui provient apparemment de l'engrais, cette proportion augmente. En effet, seulement deux à trois semaines après le fractionnement, les 66 % du N qui sera prélevé des engrais se retrouve déjà dans les plants. Ainsi, entre la floraison et la récolte, soit deux mois plus tard pour la 'Norland' et trois mois plus tard pour la 'Russet B.', le prélèvement de l'engrais n'augmente environ que du tiers.

Troisièmement, l'irrigation a eu un impact important sur les CUA du N de l'engrais. En effet, même pour l'année 2009 qui a connu peu d'épisodes d'irrigation, des différences significatives ont été mesurées pour le cultivar tardif 'Russet B.' (Tableaux 8 et 9). En 2010, les différences étaient encore plus présentes et se retrouvaient chez les deux cultivars. Ainsi, en 2009, les plants 'Russet B.' irrigués à 50 % de la RU ($I_{50\%-N}$) avaient déjà, dès la floraison, un CUA du N 33 % plus élevé ($P < 0,05$) que celui des plants non irrigués (I_0-N) (Tableau 8). À la récolte, leur CUA était toujours plus élevé du quart ($P < 0,05$) (Tableau 9). En 2010, à la floraison, les deux cultivars présentaient des CUA du N supérieurs pour les plants ($I_{50\%-N}$), comparativement aux plants non irrigués (I_0-N). Les différences étaient du tiers et du quart pour les cultivars 'Norland' et 'Russet B.', respectivement (Tableaux 6 et 8). Par contre, dans les deux cas, l'irrigation à 65 % de la RU n'a pas permis un prélèvement accru du N des engrais. Les plants ($I_{65\%-N}$) présentaient donc des CUA similaires à ceux des plants non irrigués (I_0-N). À la récolte, dans le cas du cultivar Norland, le traitement à 50 % de la RU ne présentait plus de différence avec le traitement de référence non irrigué I_0-N . Par contre, l'application de la consigne à 65 % de la RU a entraîné une diminution significative très marquée du tiers du CUA du N des engrais (Tableau 7). Pour la 'Russet B.', une situation similaire a été calculée et si les plants irrigués à 50 % de la RU avaient un CUA du N équivalent à celui des plants non irrigués I_0-N , celui des plants irrigués à 65 % de la RU était de 21 % plus faible.

Ainsi, le choix de la consigne d'irrigation a joué un rôle primordial sur les bénéfices pouvant être tirés de cette pratique et, tel qu'il le sera discuté dans la section suivante, sur les risques environnementaux liés à la part non utilisée des engrais azotés. Par exemple, pour la 'Russet B.',

lors d'une année 'plus humide' présentant moins d'épisodes d'irrigation, la consigne la plus adaptée (50 % de la RU) a permis de produire autant de rendement vendable tout en prélevant davantage de N des engrais. Plus précisément, les plants I_{50%}-N ont prélevé 22 kg N ha⁻¹ de plus des engrais que les plants I₀-N. De même, lors d'une année 'plus sèche', présentant une irrigation soutenue, la consigne la plus adaptée (50 % de la RU) a permis de produire plus de rendement vendable sans hausser la part non utilisée du N des engrais. En fait, lors de la saison 'plus sèche' de 2010, l'application de la consigne à 65 % de la RU a fait en sorte que 37 et 21 kg N ha⁻¹ de plus des engrais sont restés non prélevés, et donc dans l'environnement, pour la 'Norland' et la 'Russet B.', respectivement, comparativement au traitement non irrigué I₀-N de chacun. Lors de la dernière enquête réalisée en 2000 par la FPPTQ, la ferme modèle avait 103,8 ha en production de pommes de terre (FPPTQ, 2011b). Sur cette base, c'est théoriquement 3 841 et 2 180 kg N de plus de laissés dans l'environnement par ferme pour les cultivars 'Norland' et la 'Russet B.', respectivement. Si l'on fait une moyenne (29 kg N ha⁻¹) pour les deux cultivars, pour les 18 000 ha en pommes de terre au Québec en 2010 (Institut de la statistique du Québec, 2010), cela totaliserait 522 000 kg N ha⁻¹, ce qui est non négligeable.

Tableau 6. Prélèvements et coefficient partiel d'utilisation apparente de l'azote par les plants de pommes de terre 'Norland' au stade pleine floraison en 2009 et 2010.

Années	Irrigation (% RU)	Fertilisation (kg N ha ⁻¹)	Prélèvements (kg N ha ⁻¹)			UA [‡] (kg N ha ⁻¹)	CUA (%)	CE Irr./non irr.
			Plants	Tubercules	Total [†]			
2009	Aucune	0	20	-	20 ^{a§}			
	65	0	19	-	19 ^a	-0,5		
	Aucune	150	86	-	86 ^b	67	45	
	50	150	82	-	82 ^b	63	42	94
	65	150	75	-	75 ^b	56	37	83
2010	Aucune	0	22	-	22 ^a			
	65	0	12	-	12 ^a	-10		
	Aucune	150	75	-	75 ^b	53	36	
	50	150	94	-	94 ^c	73	48	136
	65	150	74	-	74 ^b	52	35	98

[†] Les prélèvements partiels en N des plants sont ceux des fanes.

[‡] Quantité de N provenant de l'engrais.

[§] Les valeurs ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de P < 0,05 à moins d'indication contraire.

Tableau 7. Prélèvements totaux et coefficient d'utilisation apparente final de l'azote par les plants de pommes de terre 'Norland' à la récolte en 2009 et 2010.

Années	Irrigation (% RU)	Fertilisation (kg N ha ⁻¹)	Prélèvements (kg N ha ⁻¹)			UA [‡] (kg N ha ⁻¹)	CUA (%)	CE Irr./non irr.
			Plants	Tubercules	Total [†]			
2009	Aucune	0	11	41	52 ^{a§}			
	65	0	7	26	33 ^a	-19		
	Aucune	150	29	122	151 ^b	99	66	
	50	150	25	121	146 ^b	94	63	95
	65	150	30	112	142 ^b	90	60	91
2010	Aucune	0	11	38	49 ^a			
	65	0	10	20	30 ^{b¶}	-19		
	Aucune	150	41	112	153 ^c	104	69	
	50	150	36	110	146 ^c	97	65	94
	65	150	41	74	116 ^d	67	45	64

[†] Les prélèvements totaux en N des plants sont la somme des prélèvements en N des fanes et des tubercules (rendement total).

[‡] Quantité de N provenant de l'engrais.

[§] Les valeurs ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.

[¶] Le traitement I_{65%}-N₀ est différent à $P = 0,06$ du traitement I₀-N₀, mais à $P < 0,001$ des autres traitements.

Tableau 8. Prélèvements et coefficient d'utilisation apparente partiel de l'azote par les plants de pommes de terre 'Russet B. au stade pleine floraison en 2009 et 2010.

Années	Irrigation (% RU)	Fertilisation (kg N ha ⁻¹)	Prélèvements (kg N ha ⁻¹)			UA [‡] (kg N ha ⁻¹)	CUA (%)	CE Irr./non irr.
			Plants	Tubercules	Total [†]			
2009	Aucune	0	22	-	22 ^{a§}			
	65	0	25	-	25 ^a	3		
	Aucune	150	83	-	83 ^b	60	40	
	50	150	102	-	102 ^c	79	53	132
	65	150	89	-	89 ^{bc}	67	44	110
2010	Aucune	0	22	-	22 ^a			
	65	0	18	-	18 ^a	-5		
	Aucune	200	84	-	84 ^b	61	31	
	50	200	99	-	99 ^c	77	38	125
	65	200	83	-	83 ^b	60	30	98

[†] Les prélèvements partiels en N des plants sont ceux des fanes.

[‡] Quantité de N provenant de l'engrais.

[§] Les valeurs ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.

Tableau 9. Prélèvements totaux et coefficient d'utilisation apparente final de l'azote par les plants de pommes de terre 'Russet B.' à la récolte en 2009 et 2010.

Années	Irrigation (% RU)	Fertilisation (kg N ha ⁻¹)	Prélèvements (kg N ha ⁻¹)			UA [‡] (kg N ha ⁻¹)	CUA (%)	CE Irr./non irr.
			Plants	Tubercules	Total [†]			
2009	Aucune	0	13	53	66 ^{a§}			
	65	0	14	56	70 ^a	3		
	Aucune	150	28	125	153 ^b	87	58	
	50	150	45	131	176 ^c	109	73	126
	65	150	25	124	149 ^b	82	55	95
2010	Aucune	0	13	46	58 ^a			
	65	0	9	29	38 ^b	-21		
	Aucune	200	41	117	156 ^c	98	49	
	50	200	39	121	159 ^c	101	50	103
	65	200	29	107	136 ^{d¶}	77	39	79

[†] Les prélèvements totaux en N des plants sont la somme des prélèvements en N des fanes et des tubercules (rendement total).

[‡] Quantité de N provenant de l'engrais.

[§] Les valeurs ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d'indication contraire.

[¶] Le traitement I_{65%}-N est différent à $P = 0,06$ du traitement I₀-N, mais à $P < 0,001$ des autres traitements.

4.1.4 Gains économiques par comparaison des rendements commercialisables

4.1.4.1 Contexte et méthode

Le principe des rendements marginaux décroissants - s'appuie sur le fait que lorsqu'un intrant est ajouté dans un procédé de production, le gain sur la quantité de produits diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche du maximum atteignable. Ce principe est illustré à la Figure 33 qui représente la relation entre un produit et un intrant de production. On y constate que la quantité produite, mesurée sur l'ordonnée (y), augmente à un taux croissant jusqu'au point d'inflexion (x_1 , y_1). À partir de ce point, jusqu'au maximum de la fonction de production (x_2 , y_2), la quantité produite augmente toujours, mais à un taux décroissant. Enfin, la fonction de production devient décroissante à partir du point où la quantité d'intrants dépasse x_2 .

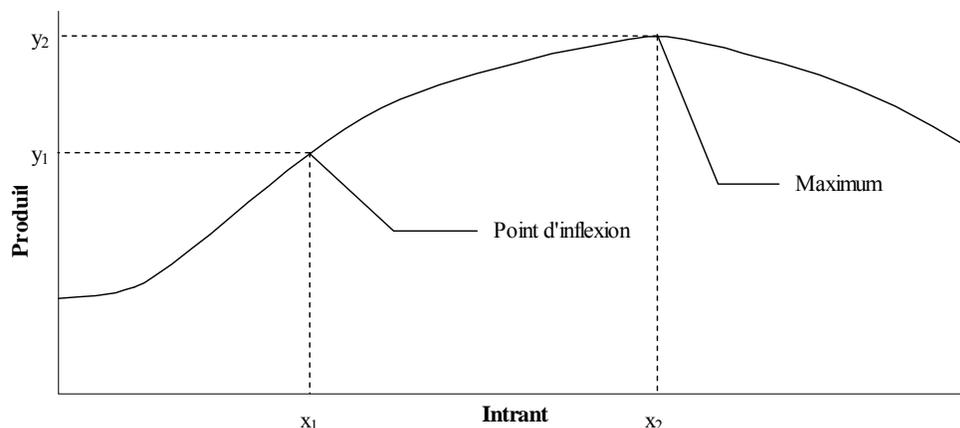


Figure 33. Fonction de production et rendements marginaux décroissants.

Dans le projet actuel, l'analyse économique consiste donc à vérifier, dans un premier temps, si le principe des rendements marginaux décroissants s'observe pour les différents traitements d'irrigation mis à l'essai. Dans l'éventualité où ce principe s'observe, l'étape suivante consiste à trouver quel traitement maximise le profit. Cette maximisation est obtenue lorsque le prix de l'ajout supplémentaire d'intrant égale le gain produit, i.e. quand ajouter des épisodes d'irrigations ne rapporte plus davantage que ce que cela coûte (Debertin, 1986).

Dans le contexte de ce projet, seuls les traitements avec fertilisation sont comparés pour mesurer l'impact de l'irrigation puisque l'absence de fertilisation en N ne correspond pas à une situation de production susceptible de se produire. Les valeurs de prix utilisées sont les moyennes annuelles du prix des pommes de terre vendues en vrac pour 2009 et 2010, tel qu'affiché par la Fédération des producteurs de pommes de terre du Québec (FPPTQ, 2011a). Ces prix varient selon qu'il s'agisse de pommes de terre blanches ou rouges. Le prix moyen pour le cultivar Russet B. était de 341,79 \$ t⁻¹ en 2009 et de 349,52 \$ t⁻¹ en 2010. Pour le cultivar Norland, le prix moyen était de 343,32 \$ t⁻¹ en 2009 et de 405,29 \$ t⁻¹ en 2010. Au chapitre des coûts, les Références économiques du CRRAQ rapportent un coût d'irrigation de 143,00 \$ ha⁻¹ dans la pomme de terre (CRAAQ, 2010).

4.1.4.2 Résultats

Comme illustré à la Figure 34 le principe des rendements marginaux décroissants n'est pas observé en passant de la consigne d'irrigation à 50 % de la RU (D) à celle de 65 % de la RU (E). En effet, pour le traitement $I_{65\%}\text{-N}$ (E), lors des deux années et pour les deux cultivars, le rendement était inférieur à celui du traitement $I_{50\%}\text{-N}$ (D). Par conséquent, la régie d'irrigation dont la consigne se situe à 65 % de la RU (E) ne semble pas optimale d'un point de vue économique pour les deux cultivars mis à l'essai. En ce qui concerne la consigne d'irrigation à 50 % de la RU (D), celle-ci procure des rendements supplémentaires uniquement pour le cultivar Russet B. En considérant ces données de rendements vendables, en plus des valeurs de prix et de coûts présentées précédemment, il est possible d'établir le profit à la marge généré par les différentes consignes d'irrigation, comparativement à l'absence d'irrigation ($I_0\text{-N}$) (C), tout étant égal par ailleurs. Autrement dit, il est possible de calculer à quel point les traitements comparés produisent plus ou moins de profit que le traitement témoin. C'est ce que présente la Figure 34, soit la variation du profit selon la consigne d'irrigation employée ($I_{50\%}\text{-N}$ et $I_{65\%}\text{-N}$), comparativement à la régie sans irrigation $I_0\text{-N}$ (C).

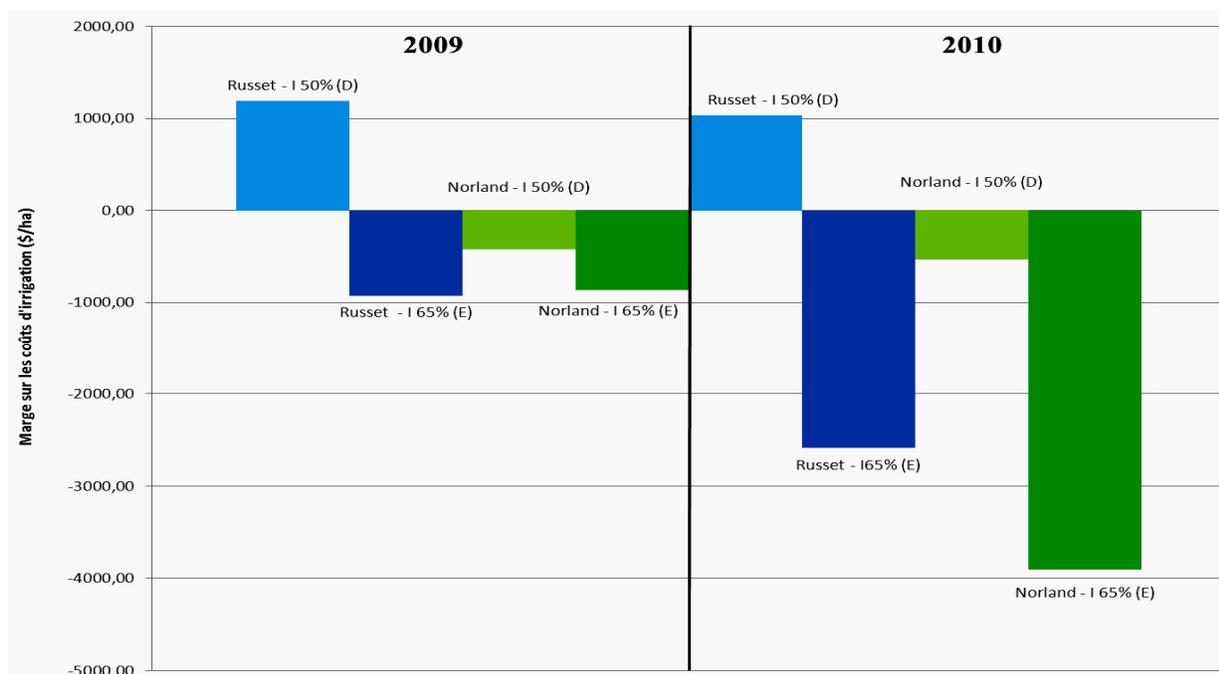


Figure 34. Profit à la marge de l'irrigation de la pomme de terre.

En premier lieu, pour les deux années et les deux cultivars, le traitement le plus irrigué $I_{65\%}\text{-N}$ (E) ne génère jamais de profit supplémentaire comparativement au traitement le moins irrigué $I_{50\%}\text{-N}$ (D). Ce résultat s'explique d'abord par un coût plus grand dû aux épisodes d'irrigation plus nombreux de la consigne à 65 % de la RU (E), comparativement à celle à 50 % de la RU (D). De plus, les rendements supplémentaires mesurés dans le traitement $I_{65\%}\text{-N}$ (E), comparativement au traitement témoin $I_0\text{-N}$, sont plus faibles que ceux du traitement $I_{50\%}\text{-N}$ (D). Un autre constat est à

l'effet que l'irrigation ne génère jamais de rentabilité plus grande que la non irrigation pour le cultivar Norland. Pour ce qui est du cultivar Russet B., les résultats économiques montrent que la consigne d'irrigation à 50 % de la RU (D) est plus avantageuse que la consigne à 65 % (E), autant en 2009 qu'en 2010.

Il semble donc que la consigne d'irrigation à 50 % de la RU (D) procure de meilleurs résultats économiques que l'absence d'irrigation pour la 'Russet B.' et que, globalement, la consigne à 65 % de la RU (E) a un impact négatif sur la marge de profit générée. De plus, la consigne à 65 % de la RU (E) a fait augmenter les pertes d'azote, contrairement à la consigne à 50 % de la RU (D). Il semble donc que la performance économique soit compatible avec la performance agroenvironnementale puisque la consigne à 50 % de la RU (D) qui procure un bénéfice sur la marge accrue est aussi celle qui permet autant, sinon davantage, de prélèvements du N des engrais. Devant ce constat, il serait intéressant et pertinent de valider par la réalisation d'autres travaux sur l'irrigation de la pomme de terre où se situe plus précisément, selon les types de sols et les cultivars, la consigne d'irrigation optimale.

4.1.5 Teneur en nitrates des eaux de lessivage et résiduelle dans les sols à la récolte

Le suivi en continu du lessivage du nitrate dans les parcelles met au jour, premièrement, que les concentrations en N-NO₃ des divers traitements commencent à se dissocier dès le début des irrigations (Figure 35 à 39). Toutefois, en second lieu, les premières hausses importantes de teneurs en nitrates se produisent par après, lors de la 2^e application de N au fractionnement. En 2010, cette hausse est très marquée pour le traitement irrigué à 65 % de la RU et ce, pour les deux cultivars, comparativement aux autres traitements (Figures 36 et 38). Ceci concorde avec les CUA finaux beaucoup plus faibles de ce traitement cette même année (Tableaux 7 et 9) et suggère fortement que la part plus importante du N non prélevé a été lessivée, d'autant plus que pour les deux cultivars, le contenu en nitrates résiduels du sol de ce traitement à la récolte était le plus faible (Figures 39 et 40 B). De même, il est fort intéressant de constater que dans le cas du traitement irrigué à 50 % de la RU, il y a aussi concordance entre les CUA et le nitrate lessivé. Ainsi, pour les deux cultivars, le traitement irrigué à 50 % de la RU présente des CUA équivalents à ceux du traitement non irrigué I₀-N et, en parallèle, des teneurs en N-NO₃ des eaux lessivées qui demeurent aussi près de celles du traitement I₀-N, à part une hausse temporaire au fractionnement, et ceci malgré le fait que 2010 ait été une saison avec plusieurs épisodes d'irrigation. L'analyse statistique démontre aussi que les teneurs en nitrates résiduels de ces deux traitements n'étaient pas significativement différentes. Ceci est particulièrement intéressant si l'on considère qu'en 2010, le traitement I_{50%}-N a donné un meilleur rendement vendable pour la 'Russet B.' que le traitement I₀-N. Il semble donc qu'il serait possible, en intervenant sur les consignes de déclenchement de l'irrigation, et avec une régie adéquate, de favoriser une meilleure production en tubercules vendables sans accroître significativement les pertes de N par lessivage.

Troisièmement, exception faite du traitement I_{65%}-N qui perd beaucoup de N dès le début, l'ensemble des autres traitements, incluant les témoins non fertilisés, voit leur teneur en N-NO₃ s'accroître fortement à partir du défanage. Il serait donc pertinent, dans le cadre d'une autre étude, de vérifier à cette date les teneurs en nitrates résiduels du sol. De plus, une régie durable devrait peut-être considérer réduire au maximum la teneur en nitrates résiduels non pas seulement à la récolte, mais à partir du défanage. Il y a en effet un lien établi entre la teneur en nitrates résiduels du sol et les risques de lessivage des nitrates. Ainsi, l'ensemble de ces résultats renforce la nécessité de tester et d'ajuster les consignes d'irrigation afin que celles-ci bonifient la nutrition des cultures tout en lessivant le moins possible les nutriments en dehors de la zone utile de sol.

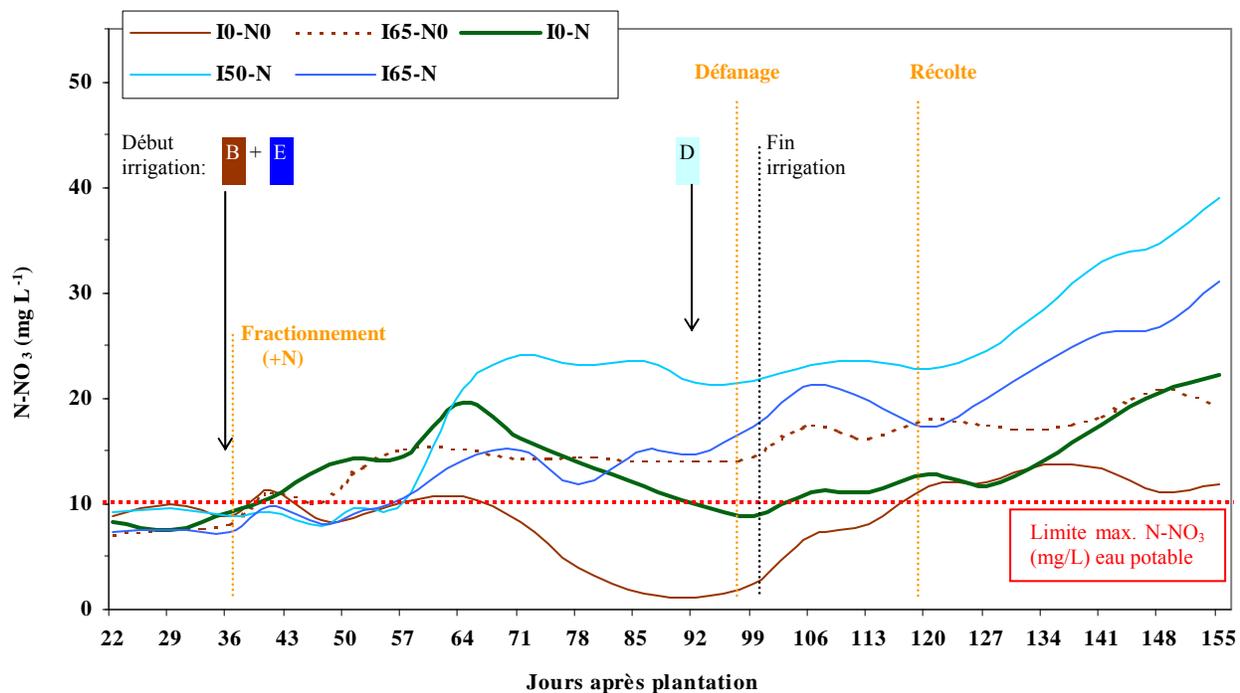


Figure 35. Concentrations hebdomadaires en N-NO₃ dans l'eau des lysimètres durant la saison 2009 dans les parcelles du cultivar Norland.

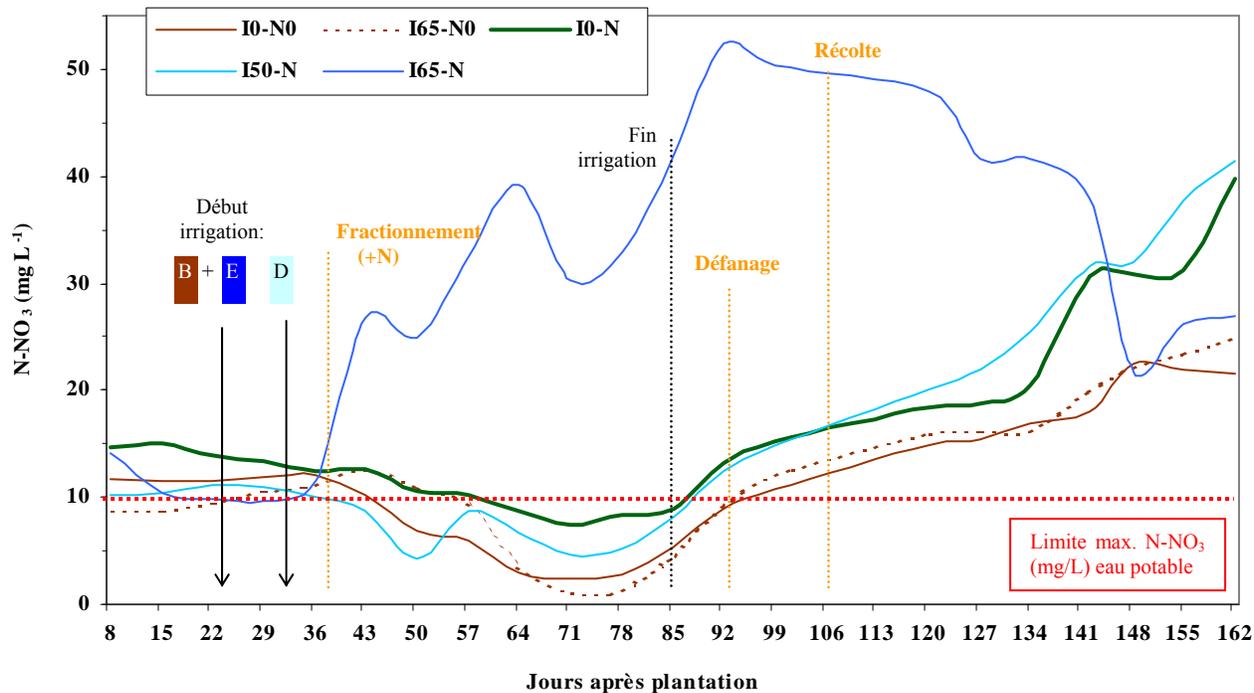


Figure 36. Concentrations hebdomadaires en N-NO₃ dans l'eau des lysimètres durant la saison 2010 dans les parcelles du cultivar Norland.

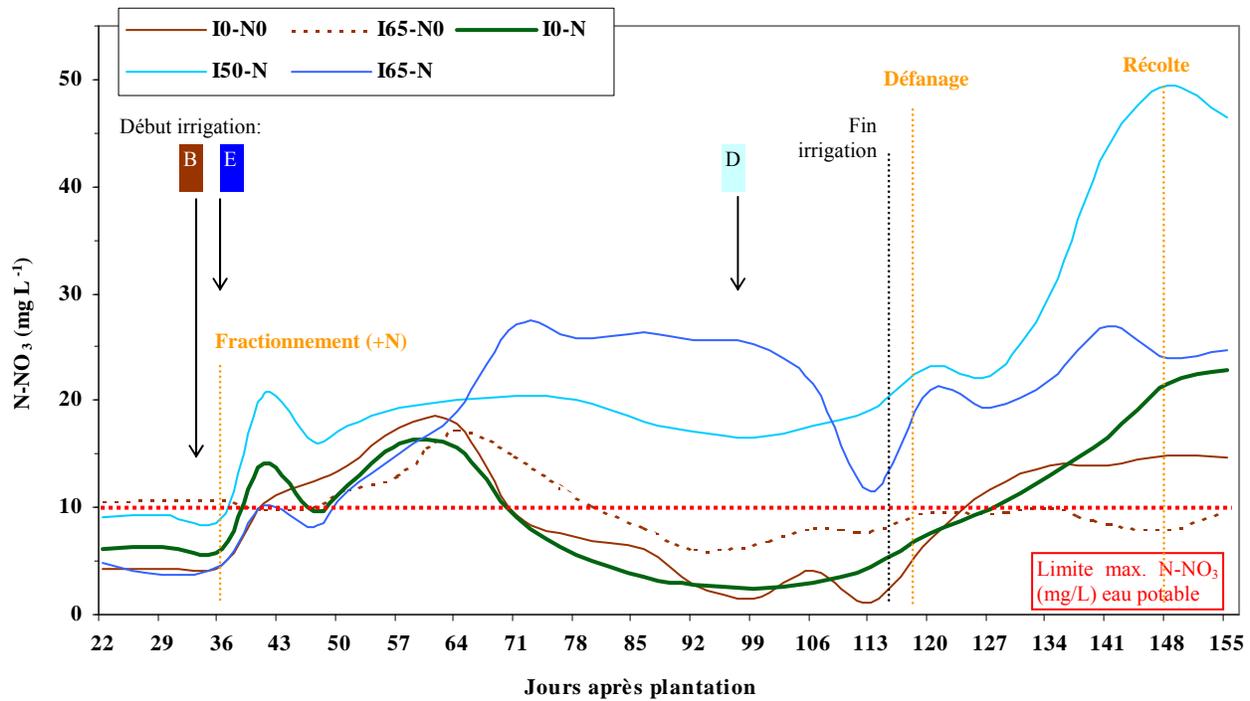


Figure 37. Concentrations hebdomadaires en N-NO₃ dans l'eau des lysimètres durant la saison 2009 dans les parcelles du cultivar Russet B.

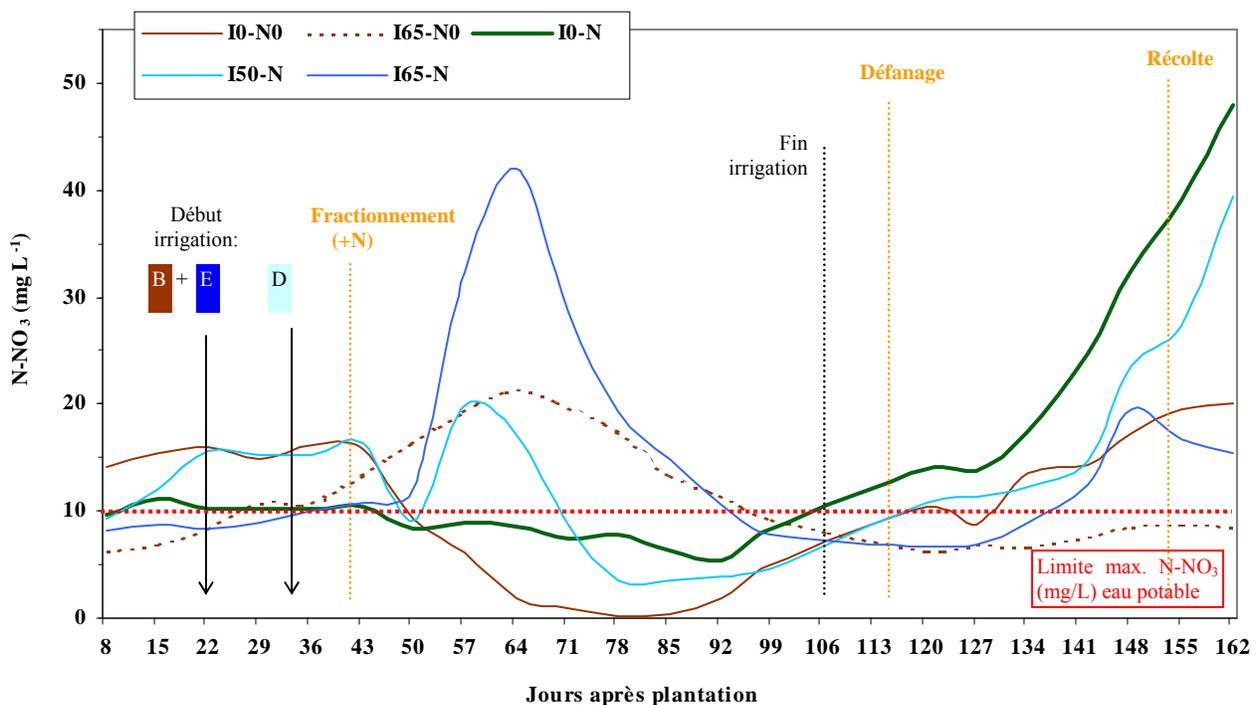


Figure 38. Concentrations hebdomadaires en N-NO₃ dans l'eau des lysimètres durant la saison 2010 dans les parcelles du cultivar Russet B.

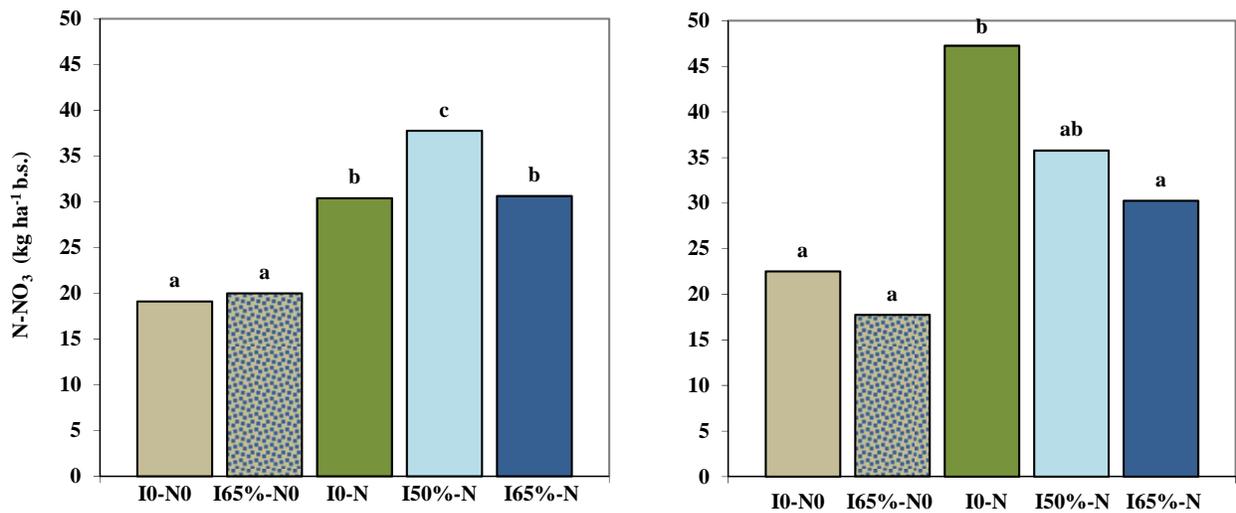


Figure 39. Teneur en nitrates résiduels dans la couche de sol (0-20 cm) dans les parcelles de ‘Norland’ en 2009 (A) et 2010 (B) à la récolte. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d’indication contraire.

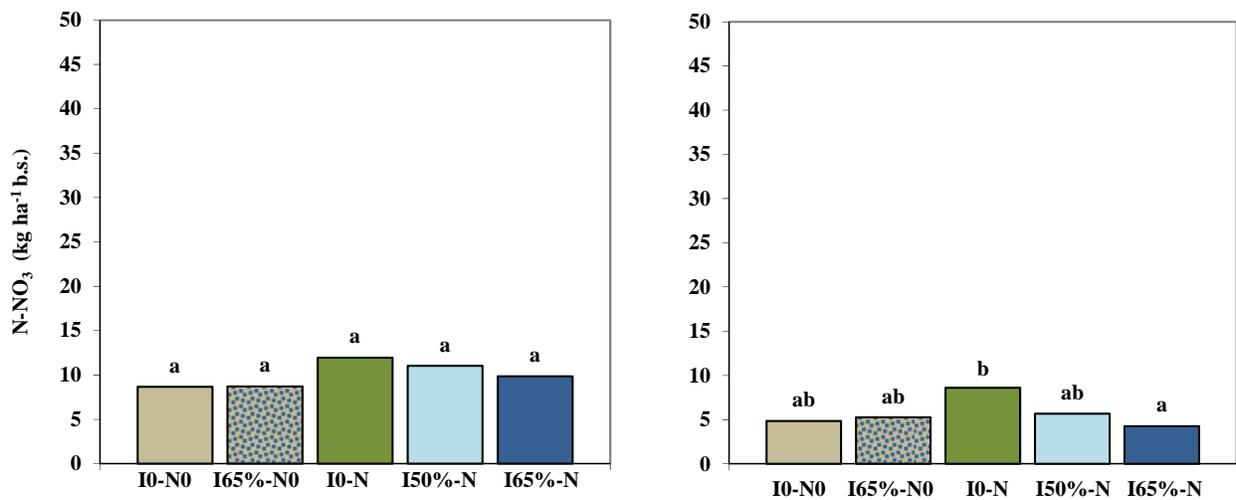


Figure 40. Teneur en nitrates résiduels dans la couche de sol (0-20 cm) dans les parcelles de ‘Russet B.’ en 2009 (A) et 2010 (B) à la récolte. Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à moins d’indication contraire.

4.2 Mise à l'essai de la méthode de pilotage de l'irrigation française IRRINOV[®] afin d'expérimenter son potentiel d'utilisation au Québec

La méthode IRRINOV[®] est disponible en France depuis le début des années 2000. Les objectifs de cette dernière sont d'alimenter la pomme de terre en eau sans gaspillage et d'obtenir une efficacité maximale de l'irrigation, un bon rendement et une bonne qualité en l'absence de facteurs limitants autres que l'alimentation en eau. Cette méthode considère le stade de développement, le type de production et le cultivar pour gérer les apports d'eau. Elle comprend trois étapes :

1. Le déclenchement de l'irrigation;
2. L'arrêt des épisodes d'irrigation;
3. La reprise des épisodes d'irrigation.

Pour l'instant, cette méthode a été adaptée et validée en France pour plusieurs cultivars, dont la Russet B. La méthode IRRINOV[®] est basée sur une connaissance précise des sols en culture de pomme de terre des régions françaises du Santerre et du Nord Pas-de-Calais, Centre et Île de France à savoir des sols de limon, sols argileux et sols de limon argileux.

Cet outil fourni aux producteurs de ces régions des seuils de déclenchement du système d'irrigation par l'utilisation de tensiomètres. Différentes valeurs de tension, exprimées en kPa ou cbar, propres à chaque cultivar et chacun des stades de développement des plants, font office de seuils de déclenchement des irrigations. La méthode IRRINOV[®] est conçue pour un environnement « où la capacité d'irrigation (ressource en eau, matériel et main d'œuvre) est confortable et permet de couvrir les besoins en eau d'irrigation de la huitième année sèche [...] » (Arvalis, 2006).

Cette méthode utilise des observations au champ en fonction des différents stades de développement qui sont « levée », « initiation de la tubérisation », « fermeture des rangs », « début de sénescence » et « défanage » (Arvalis, 2006). Pour chacun de ces stades de développement, des valeurs de tension (kPa) doivent être lues sur les tensiomètres afin d'initier un épisode d'irrigation. Les tensiomètres sont installés à des profondeurs de 30 et 60 cm et une importance entre les valeurs de tension observées à ces deux profondeurs est à considérer. Des tensions plus importantes en surface qu'en profondeur sont à prévoir, les valeurs de seuils de déclenchement sont donc généralement plus élevées pour les tensiomètres à 30 cm que ceux à 60 cm.

Cette méthode est adaptable à différentes superficies cultivées ainsi qu'aux divers systèmes d'irrigation, tel que canon enrouleur, rampe sur enrouleur, rampe autonome et couverture intégrale (gicleurs). Dépendamment du nombre de jours nécessaire à l'irrigation de l'ensemble des cultures, les valeurs seuils des tensions varieront. Cette valeur sera donc plus faible pour un tour d'eau nécessitant un nombre de jour plus important, évitant ainsi une trop forte élévation de la tension.

La méthode utilise des tensiomètres Watermark[®] afin de faire le suivi des conditions hydriques du sol en culture. Ces derniers doivent afficher les valeurs correspondantes du seuil de déclenchement de l'irrigation afin que celle-ci débute. Un pluviomètre est également employé à

des fins de validation de la hauteur d'eau appliquée (mm) avec la valeur correspondante théorique (mesurée grâce au débit de l'eau d'irrigation, le temps d'un épisode d'irrigation ainsi que la surface irriguée), des variations allant jusqu'à 15 % sont jugées acceptables. Les seuils varient en fonction du cultivar de pomme de terre, du stade de croissance de la culture, du type de sol et du temps nécessaire à irriguer l'ensemble de la culture. Ces derniers ont pu être établis par la connaissance de la réserve facilement utilisable (RFU) en eau des sols étudiés et des cultivars utilisés. Cette réserve correspond à la quantité d'eau retrouvée dans un sol entre la capacité au champ (CC) et le point de flétrissement temporaire (PFT). La CC est propre à chaque sol, car elle détermine la quantité d'eau maximale retenue par les forces d'adhésion de ce dernier, qui sont fonction de la texture, structure et présence de matière organique. Le PFT, quant à lui, est propre à une culture et est en fonction du sol. Lorsque la tension du sol tend vers le point de flétrissement temporaire de la culture, un épisode d'irrigation devrait être déclenché afin rabaisser la valeur de tension vers la capacité au champ. Si l'apport d'eau est retardé, la valeur de tension atteindra le PFT occasionnant des dommages à la culture. Advenant un épisode d'irrigation au moment prévu, ce dernier doit appliquer un volume d'eau nécessaire au retour de la tension à la valeur de CC. Tout volume d'eau excédentaire sera alors perdu en profondeur, n'aura pas contribué à la croissance de la culture et pourra être considéré comme une perte économique et environnementale. À chacun de ces points précis correspond une valeur de tension exprimée en centibars (cbar) ou kilopascals (kPa). Par la connaissance de cette réserve d'eau utile à la plante, les irrigations peuvent être effectuées lorsqu'une fraction connue, et ciblée, de la RFU a été prélevée par la végétation et/ou évaporée. Les irrigations ont donc lieu lorsque les valeurs indiquées par les tensiomètres correspondent à la limite de la fraction de la RFU optimale à la culture.

Le seuil de déclenchement des épisodes d'irrigation avec cette méthode est fixé de 40 à 50 % par rapport à la valeur maximale de la réserve en eau facilement utilisable par la culture (RFU), soit la CC (communication personnelle, Jean-Marc Deumier, Arvalis, 4 octobre 2011). Ce seuil, pour le sol de ce projet, correspond à des valeurs de teneur en eau volumique de 25 à 26,6 % et à une tension avoisinant 8,5 kPa observable à une profondeur de 30 cm. Comparativement aux sols de France décrits dans la documentation, les seuils de déclenchement étaient liés à des tensions débutant à 20 kPa et variaient en fonction du type de sol, du stade de développement de la culture et de la durée du tour d'eau. Cette différence importante de tension illustre bien l'importance de connaître les propriétés physiques du sol, car ces dernières varieront grandement en fonction du type de sol.

Les conditions climatiques et l'absence de données concernant la fertilité du sol sont des facteurs d'influence quant au développement des cultures, modifiant donc les besoins hydriques des plants ainsi affectant directement la tension du sol. Le tableau 10 illustre les différences entre Lille, une des régions françaises où la méthode Irrinov[®] pomme de terre est utilisée, Québec ainsi que Deschambault.

Tableau 10. Valeurs météorologiques.

Mois	Lille (Nord Pas-de-Calais)			Ville de Québec			Deschambault (site expérimental, 2010)		
	Tmin	Tmax	Précip	Tmin	Tmax	Précip	Tmin	Tmax	Précip
Mai	8,4	17,5	62,5	5,5	17,1	105,0	6,3	20,2	35,6
Juin	11,0	20,0	68,1	10,6	22,2	114,2	11,2	21,9	97,0
Juillet	13,1	22,7	61,2	13,4	25,0	127,8	14,1	25,5	22,4
Août	12,9	23,1	52,8	12,4	23,4	116,7	13,3	24,7	59,8
Septembre	10,7	19,4	62,6	7,2	17,7	125,5	11,6	18,7	168,2

Sources : www.meteofrance.com ; www.meteo.gc.ca

À première vue, cette méthode de détermination des seuils d'irrigation est semblable à celle employée dans le cadre de ce projet. La différence majeure de la méthode Irrinov® est la variation des seuils de déclenchement des irrigations en fonctions de l'évolution des stades de croissance de la culture. Les besoins physiologiques de la plante sont donc pris en considération tout au long de la saison, jusqu'au défanage. L'irrigation, dans le cadre de ce projet, évoluait également en fonction de la croissance des plants. Effectivement, les durées d'irrigation étaient en fonction de la profondeur d'enracinement des plants de pomme de terre. L'augmentation de cette valeur provoque également une augmentation du volume de sol, faisant en sorte de hausser la valeur de la RU. Une telle variation de la RU implique donc une augmentation de l'apport en eau d'irrigation, pouvant être effectuée par le débit ou la durée d'un épisode. Afin de respecter les variations de la RU, les durées des épisodes d'irrigation pour ce projet ont donc été augmentées en fonction de la profondeur d'enracinement.

Les deux manières de gérer l'irrigation est due aux différentes classes texturales des sols. Les sols français sont de textures limoneuse et argileuse, tandis que ceux rencontrés lors du projet étaient des loams sableux. Les sols de types limoneux et argileux ont une capacité de rétention en eau beaucoup plus importante que les sols à textures sableuses, dont les loams sableux. Afin de garantir un produit final de qualité maximale, pour les pommes de terre destinées à la production de frites, la culture doit être dans un sol relativement sec ou bien drainé, tout en maintenant les besoins hydriques de la culture. Les sols à fortes proportions sableuses devront nécessairement être irrigués de manière plus abondante.

L'applicabilité de cette méthode en contexte de production québécoise semble donc envisageable. Cependant, tel que le démontre la méthodologie de ce projet, une connaissance approfondie des propriétés physiques du sol doit être connue pour établir les seuils de déclenchement des épisodes d'irrigation. Des connaissances adéquates des besoins hydriques de la culture en fonction de ses stades de développement sont également nécessaires. Une telle gestion a été effectuée lors de ce projet. Les courbes de rétention en eau et l'analyse de l'évolution des valeurs de tension du sol ont permis la mise en place des valeurs seuils et d'un volume d'eau d'irrigation à appliquer. Ces valeurs de seuil de déclenchement des irrigations et l'évolution des valeurs de tension, pour les profondeurs de 30 et 60 cm, ont été mises en graphiques (Figures 41 et 42). Pour la parcelle 21, les valeurs de tensions pour les deux profondeurs suivent généralement le même patron. La principale différence concerne les valeurs de tension plus faibles pour la profondeur de 60 cm. Une amplitude légèrement plus faible de la courbe des valeurs de tension lors des épisodes d'irrigation (carrés jaunes) est observée à la profondeur de 60 cm, comparativement à celle de 30 cm. Ces observations représentent bien les conditions qui sont fréquemment retrouvées dans le

sol. De telles observations sont également citées et représentées dans la documentation de IRRINOV[®]. Cependant, les tensions aux profondeurs de 60 cm des sols français augmentent légèrement tout au long de la saison, semblant n'être pas affectées par les épisodes d'irrigation (figure 3). Ces épisodes réduisent la hausse de tension à cette profondeur, générant une courbe à faible pente positive (Arvalis, 2006). Les tensions observées à 60 cm dans le cadre de ce projet démontrent des variations marquées lors d'épisodes d'irrigation. Cette différence est attribuable au type de sol qui favorise une infiltration de l'eau d'irrigation de la surface jusqu'à 60 cm de profondeur plus rapide, comparativement aux sols argileux et loameux (limoneux). La méthode IRRINOV[®] gère l'irrigation par l'utilisation des valeurs de tension aux profondeurs de 30 et 60 cm. La tension à 30 cm de profondeur est celle principalement utilisée en début de saison, jusqu'au stade de fermeture des rangs, car les valeurs à 60 cm sont près de 0 kPa (Arvalis, 2006). Les tensions observées sur le site expérimental de Deschambault démontrent que les valeurs de tension à la plus grande profondeur seraient à utiliser pour l'ensemble de la saison, de par leur grande variation observable suite aux apports d'eau (irrigation et pluie) (**Figure 41** et **Figure 42**).

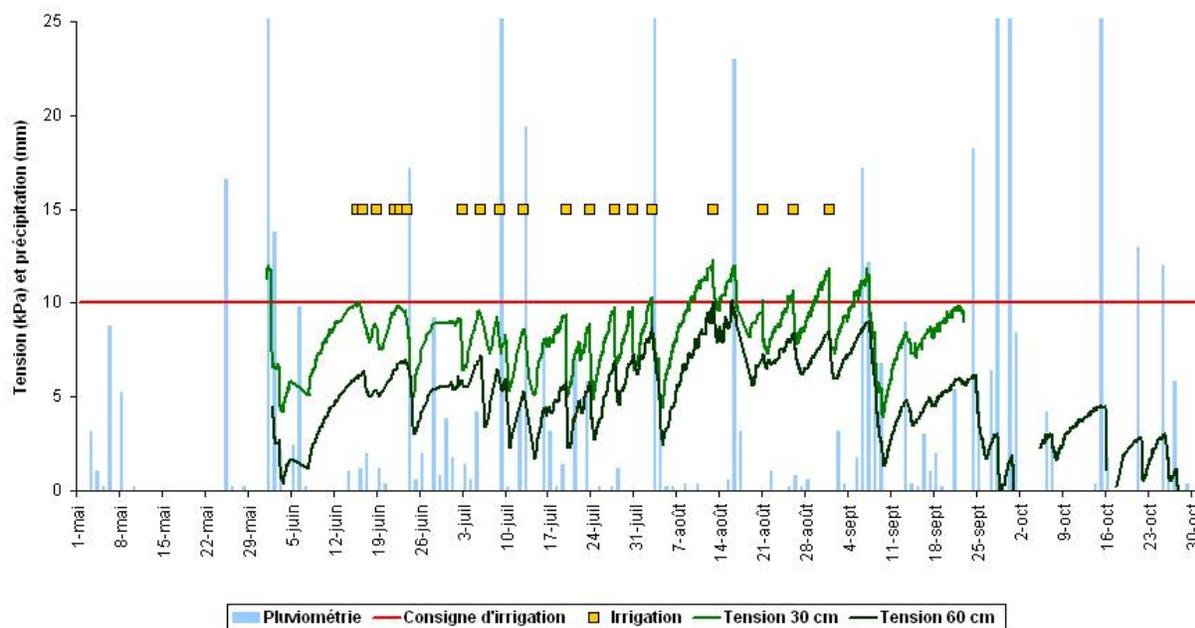


Figure 41. Tensions à 30 et 60 cm, épisodes d'irrigation et précipitations de la parcelle 21 (Russet B.) pour la saison 2010.

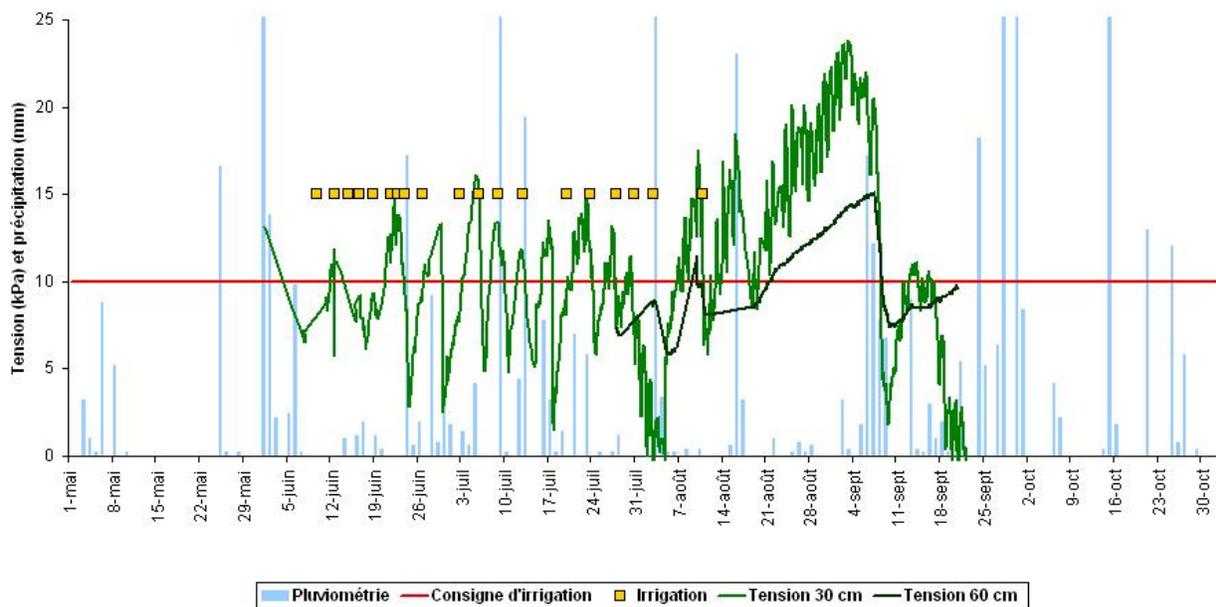


Figure 42. Tensions à 30 et 60 cm, épisodes d'irrigation et précipitations de la parcelle 13 (Norland) pour la saison 2010.

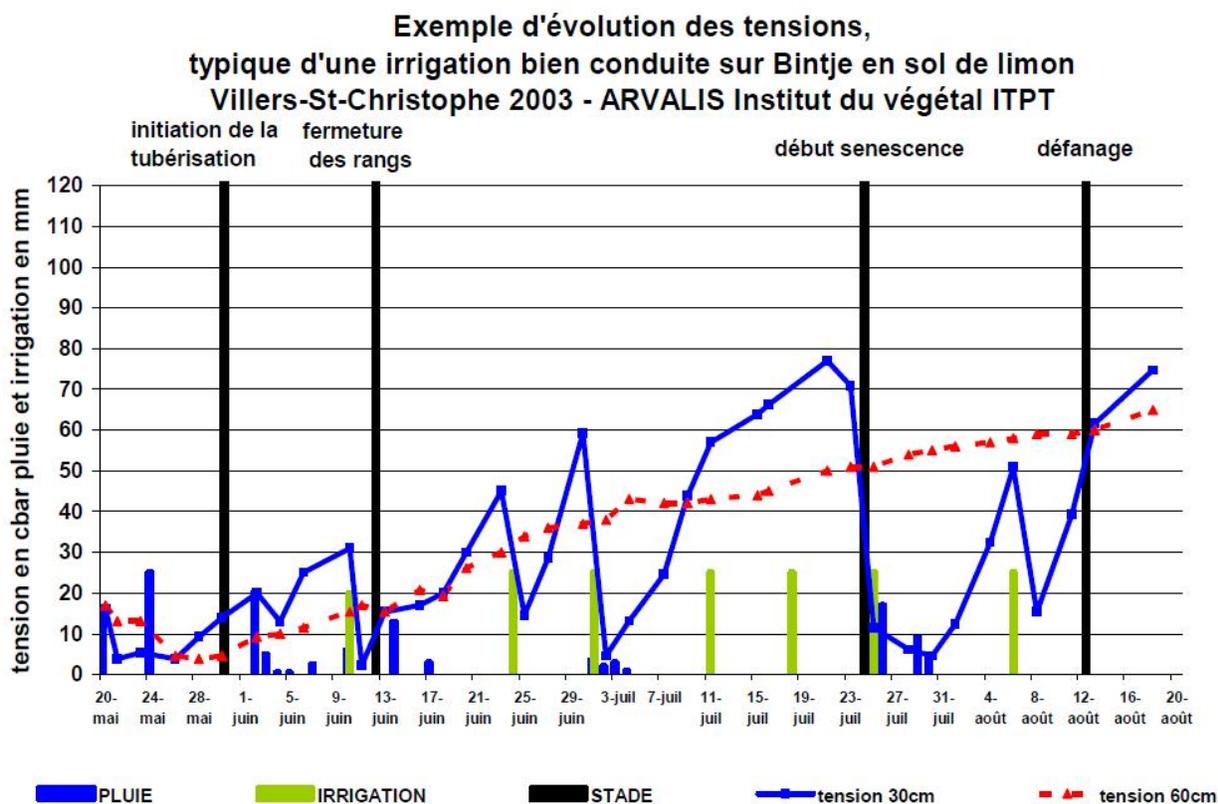


Figure 43. Évolution des tensions présentées dans le document IRRINOV[®]. Source : Arvalis, 2006.

4.3 Mise à l'essai de la méthode du bilan hydrique pour la saison de culture afin de vérifier son utilité comme méthode de pilotage de l'irrigation

Le bilan hydrique tient compte des apports et des pertes en eau pour un lieu et une période donnés. L'évapotranspiration (eau transpirée par la plante et celle évaporée à la surface du sol) explique la majeure partie de ces pertes. Ces dernières sont estimées à partir de l'équation de Penman-Monteith qui calcule l'évapotranspiration de référence (ET_o). Ce calcul se fait à partir des mesures de la radiation solaire, de la température de l'air, de l'humidité relative, de la vitesse du vent et de la pression atmosphérique. La valeur obtenue est ensuite ajustée avec un coefficient qui tient compte de la culture et de son stade de développement (K_c) afin d'obtenir l'évapotranspiration de la culture (crop évapotranspiration) (ET_c) (FAO, 1998).

Dans cette approche, il est considéré que la RFU correspond à 50 % de la RU. Par exemple, si la RU correspond à 30 mm, cette approche suggère d'apporter de l'eau lorsque les pertes sont évaluées à 15 mm. Ainsi, après une pluie qui reconstitue la RU (30 mm d'eau), on calcule la perte théorique en eau pour la journée, par exemple 5 mm, et ces pertes sont calculées jusqu'à ce qu'elles totalisent 15 mm. Dans la méthode par bilan hydrique, l'épuisement de la RFU se calcule donc théoriquement avec les pertes par évapotranspiration journalière, tandis que l'approche par tensiométrie mesure l'assèchement réel du sol. La méthode du bilan hydrique a donc été comparée à la gestion tensiométrique de l'irrigation.

La détermination de la RU du sol en culture peut être faite en déterminant les valeurs de la teneur en eau volumique du sol à la profondeur d'enracinement de 30 cm au point de flétrissement permanent (PFP) (1500 kPa) et à la capacité au champ (CC) (5 kPa). Cette valeur est souvent associée à une tension de 33 kPa (Goulet, 2001), cependant cette valeur ne tient pas compte du type de sol, diminuant donc grandement la précision de cette dernière. Selon Allaire (2004), la teneur en eau à la capacité au champ correspond à l'état hydrique du sol environ 36 heures après la saturation de ce dernier et en absence d'évapotranspiration. La méthode utilisée dans le cadre de ce projet correspond à mesurer la CC pour une période sans précipitation, 24 à 36 heures suivant un épisode de pluie ayant saturé le sol (5 kPa tel que mentionné précédemment). En soustrayant la valeur de la teneur en eau pour ce sol à la CC, soit 35,3 % à celle au PFP, soit 3,9 %, il en résulte une valeur de 31,4 %. Cette valeur, convertie en hauteur d'eau, correspond à 94 mm, soit la RU. En suivant l'approche du bilan hydrique, une irrigation devrait être effectuée à chaque fois que la valeur de ET_c atteint 50 % de la RU, soit 47 mm. Les valeurs de CC, PFP, RU et RFU sont schématisées à la Figure 44.

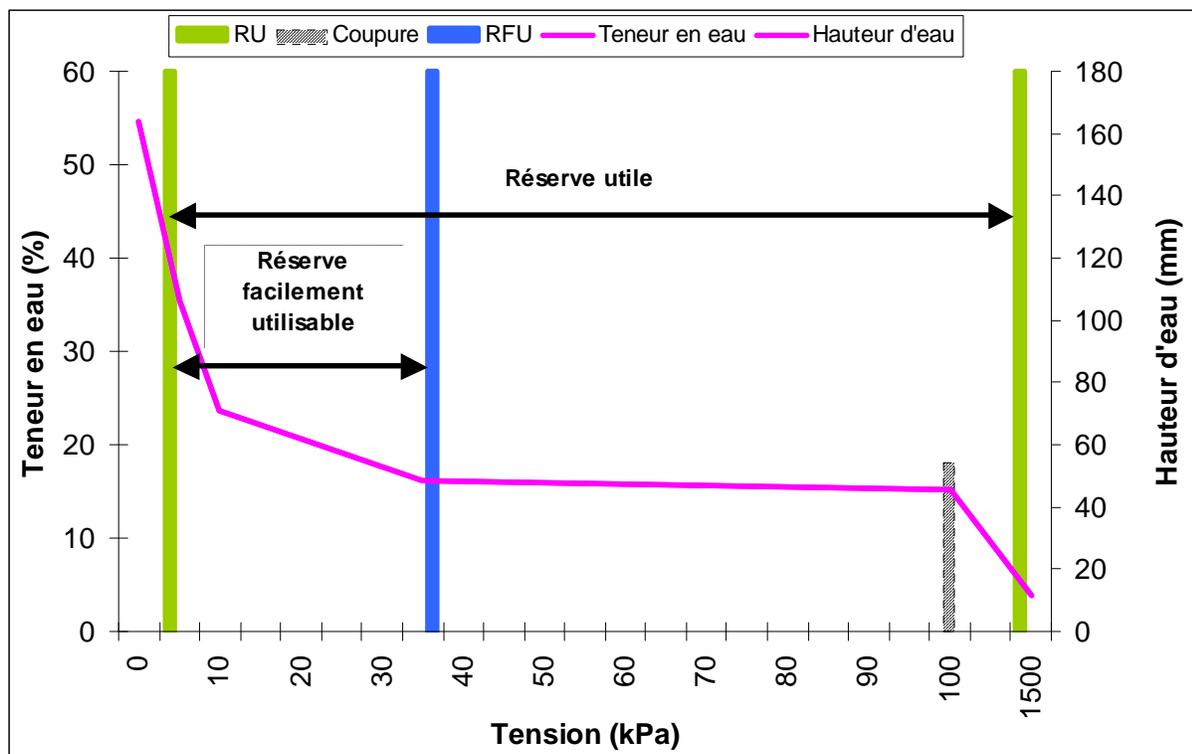


Figure 44. Teneur en eau et hauteur d'eau en fonction de la tension du sol.

Afin de comparer les deux méthodes de gestion de l'irrigation, l'ETc a été mesurée dès l'émergence des plants jusqu'au premier épisode d'irrigation effectué selon la gestion tensiométrique pour les parcelles nos 1, 9, 33 et 38, du 12 au 22 juin 2010 (

Figure 45). Lors de cette période, l'ETc calculée équivaut à 48 mm, soit très près de la valeur de 50 % de la RU (47 mm). Selon la méthode du bilan hydrique, un épisode d'irrigation aurait dû être effectué le 22 juin 2010, soit la même journée que l'épisode d'irrigation effectué avec la gestion tensiométrique. Pour cette période de la saison et pour les sous-parcelles nos 9, 33 et 38, la gestion de l'irrigation par tensiométrie et par bilan hydrique semble être comparable. Cependant, la sous-parcelle no 1 ne nécessite pas d'irrigation au 22 juin comme le démontrent les valeurs de tension. Pour l'ensemble des sous-parcelles du traitement D (I_{50%-N}), leurs nombres d'épisodes d'irrigation (moyenne de 3) étaient inférieurs à ceux qui auraient eu lieu par la méthode du bilan hydrique (6).

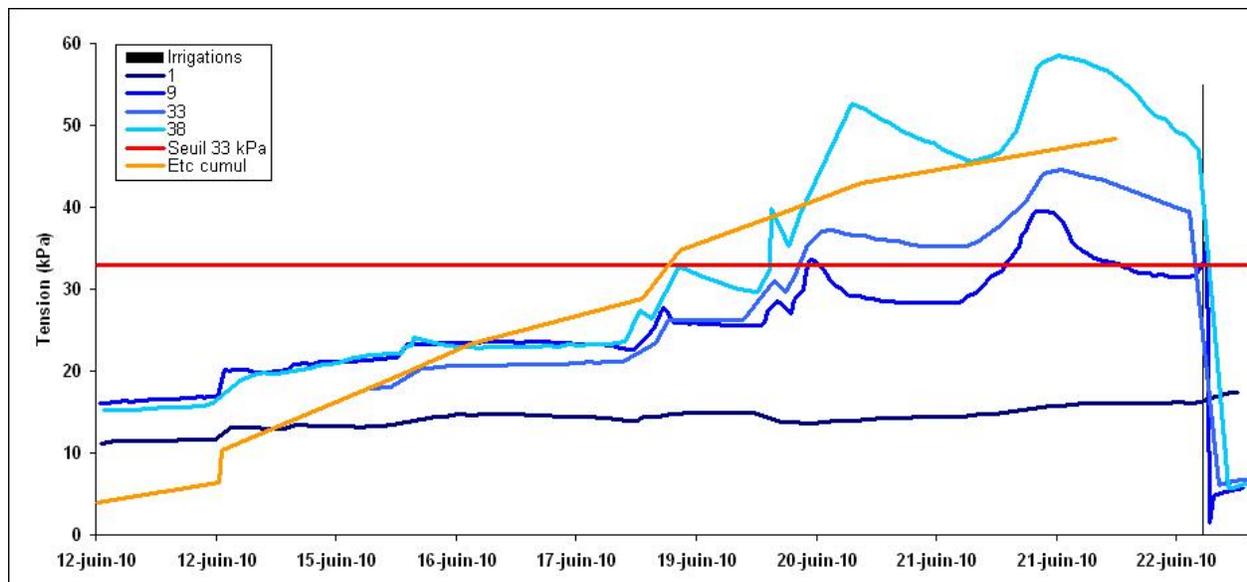


Figure 45. Gestion tensiométrique des sous-parcelles 1, 9, 33 et 38 du 12 au 22 juin 2010.

Suite au premier épisode d'irrigation, il devient complexe de comparer l'approche de gestion par bilan hydrique à celle par gestion tensiométrique. En effet, à moins d'une parfaite concordance entre les moments où la valeur de tension atteint la consigne d'irrigation et celle de l'évapotranspiration, la hauteur d'eau correspondant à la portion de la RU requise, un décalage entre la gestion de l'irrigation de ces deux méthodes se produit. Toutefois, lorsque la réserve en eau du sol est reconstituée, suite à une averse de pluie, il est possible de débiter à nouveau la comparaison entre les deux approches de gestion. Cependant, il est à noter que plus la saison avance, plus les différences de développement des plants, qui pourraient être conséquentes aux gestions différentes, rendent la comparaison hasardeuse.

Pour la période comprise entre le 23 juillet et le 10 septembre 2009, le plus grand nombre d'épisodes d'irrigation a été observé uniquement pour le traitement B (irrigué et non-fertilisé en azote) (Tableau 11). Cette observation s'expliquerait par une production plus faible de la masse aérienne conséquente à l'absence de fertilisation azotée, engendrant un couvert végétal moins dense comparativement aux traitements fertilisés en azote. Un couvert végétal moins dense laisse à découvert une plus grande surface de sol favorisant une évaporation plus importante, d'où le nombre plus important d'épisodes d'irrigation.

Tableau 11. Nombre d'épisodes d'irrigation du 23 juillet au 10 septembre 2009.

Sous-Parcelle	Traitement	Seuil irrigation (% RU)	Nombre d'irrigation	Cultivar
1	D	50	1	Norland
2	B	65	1	Norland
3	E	65	2	Norland
7	E	65	1	Russet B
9	D	50	2	Russet B
10	B	65	4	Russet B
13	E	65	1	Norland
18	B	65	3	Russet B
19	D	50	1	Russet B
21	E	65	3	Russet B
24	B	65	4	Russet B
28	B	65	4	Norland
30	E	65	2	Norland
31	B	65	1	Norland
33	D	50	1	Norland
35	E	65	1	Norland
37	E	65	2	Russet B
38	D	50	2	Russet B
39	B	65	3	Russet B

Cette observation est toute autre en 2010. L'effet des différents traitements s'est répercuté sur le nombre d'épisodes d'irrigation. Pour l'ensemble des sous-parcelles du traitement E (irrigué à 65 % de la RU et fertilisé en azote), 149 épisodes ont été effectués, faisant de ce dernier le traitement ayant appliqué le plus grand volume d'eau. Les sous-parcelles des traitements B (irrigué à 65 % de la RU et non fertilisé) et D (irrigué à 50 % de la RU et fertilisé) ont nécessité 127 et 24 épisodes d'irrigation respectivement. Ces traitements ont donc nécessité un nombre inférieur d'épisodes comparativement au traitement E ($I_{65\%}-N$). L'écart important entre le traitement D ($I_{50\%}-N$) et les traitements B ($I_{65\%}-N_0$) et E ($I_{65\%}-N$) est principalement lié au seuil de déclenchement d'irrigation. L'utilisation du traitement D fait en sorte que le déclenchement d'irrigation survient lorsque la teneur en eau du sol est de 50 % de la RU, contrairement aux traitements B ($I_{65\%}-N_0$) et E ($I_{65\%}-N$) qui déclenchent l'irrigation lorsque la teneur en eau du sol correspond à 65 % de la RU.

Tableau 12. Nombre d'épisodes d'irrigation pour la saison 2010.

Sous-Parcelle	Traitement	Seuil irrigation (% RU)	Nombre d'irrigation	Cultivar
1	D	50	3	Norland
2	B	65	15	Norland
3	E	65	17	Norland
7	E	65	19	Russet B.
9	D	50	4	Russet B.
10	B	65	22	Russet B.
11	B	65	8	Norland
13	E	65	19	Norland
16	E	65	14	Russet B.
18	B	65	17	Russet B.
19	D	50	2	Russet B.
21	E	65	19	Russet B.
24	B	65	21	Russet B.
26	D	50	2	Norland
28	B	65	18	Norland
30	E	65	19	Norland
31	B	65	7	Norland
33	D	50	4	Norland
35	E	65	20	Norland
37	E	65	21	Russet B.
38	D	50	8	Russet B.
39	B	65	21	Russet B.

La variation du nombre d'épisodes d'irrigation des différentes sous-parcelles d'un même traitement n'aurait jamais pu être observée avec une gestion de l'irrigation par bilan hydrique. Les causes de la différence du nombre d'irrigations peuvent être conséquentes à des différences texturales et structurales du sol, la présence de maladies ou de ravageurs, à la taille du couvert végétal ainsi que plusieurs autres facteurs biotiques et abiotiques. L'avantage de la gestion de l'irrigation avec des tensiomètres est que ces derniers peuvent être installés à plusieurs endroits dans un même champ pour ainsi obtenir des mesures rattachées aux différentes zones hétérogènes. Le bilan hydrique n'est pas conçu pour tenir compte des hétérogénéités présentes, le rendant ainsi moins précis en tant qu'outil de gestion de l'irrigation comparativement à la gestion tensiométrique.

5 DIFFUSION DES RÉSULTATS

Activités prévues	Activités réalisées pour la période couverte par le rapport	Description (thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Visibilité accordée au CDAQ et à AAC (logo, mention)
Rapport d'étape	Dépôt du rapport d'étape		Juin 2010		LOGO
Rapport final	Dépôt du rapport d'étape		Décembre 2011		LOGO
Présentation générale du projet	http://www.irda.qc.ca/projets/liste/290.html	Site Web de l'IRDA	Pour la durée du projet		Mention
Fiches synthèses (2) <ul style="list-style-type: none"> • Gestion raisonnée • IRRINOV® 		Site Web de l'IRDA et d'Agri-Réseau	À venir		LOGO
Journée thématique irrigation	http://www.irda.qc.ca/documents/Activities/34_fr.pdf	Journée portes ouvertes Deschambault	26 août 2010	75-100	LOGO

Activités prévues	Activités réalisées pour la période couverte par le rapport	Description (thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Visibilité accordée au CDAQ et à AAC (logo, mention)
Conférence	Programmes: http://craaq.qc.ca/Documents/Evenement/892/file/Depliant_COLLLEG10.pdf http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/BasSaintLaurent/Journeepd2011.pdf http://craaq.qc.ca/Documents/Evenements/EPDT1101/Programme_EPDT_1101.pdf	Colloque sur l'irrigation en horticulture Journée régionale en production de pommes de terre (Bas-St-Laurent) Colloque pomme de terre	25 novembre 2010 18 février 2011 18 novembre 2011	150 60 300	

6 CONCLUSIONS ET SUITE DU PROJET

Les résultats de ce projet démontrent que la consigne d'irrigation utilisée peut avoir un impact important sur la nutrition, le développement et le rendement en tubercules des plants de pommes de terre. De même, cette consigne modifie l'utilisation et le devenir de l'azote des engrais. Cette influence peut même s'exercer dès le stade floraison, lors de saison où les épisodes d'irrigation débutent tôt. De plus, cette étude prouve que l'effet de la consigne utilisée varie fortement selon les cultivars. Ainsi, le cultivar Russet B., récolté plus tardivement que le cultivar Norland, a davantage tiré profit de l'irrigation. En fait, l'analyse économique démontre que l'irrigation n'a généré aucun bénéfice monétaire supplémentaire pour le cultivar Norland, mais a significativement haussé le profit sur la marge pour cultivar Russet B., les deux années. Toutefois, pour les deux cultivars, la nutrition azotée, le CUA du N des engrais et le lessivage de N-NO₃ ont été modifiés par le choix de la consigne. Ainsi, dans les deux cas, la nutrition azotée à la floraison a été diminuée avec la consigne à 65 % de la RU. De même, la teneur en N-NO₃ du sol a été diminuée à ce stade, suivi d'une hausse de celle mesurée dans l'eau de lessivage suivant le fractionnement. Par contre, l'utilisation de la consigne à 50% de la RU, qui semble la plus adéquate sous les conditions de l'étude, a permis de hausser le développement des plants et le CUA du N des engrais au stade floraison, générant des bénéfices environnementaux pour les deux cultivars. Enfin, l'impact de l'irrigation varie aussi d'une saison à l'autre pour un même cultivar. Par exemple, dans le cas du cultivar Russet B., lors d'une saison humide présentant moins d'épisodes d'irrigation, la consigne à 50 % de la RU a surtout haussé la part prélevée des engrais N tout en élevant légèrement la marge de profit, tandis que lors d'une saison plus sèche cette même consigne a grandement haussé la marge de profit sans augmentation de la part non prélevée des engrais N et du lessivage des nitrates, comparativement au traitement non irrigué. Ainsi, cette étude démontre principalement que les bénéfices économiques de l'irrigation sont compatibles avec les gains environnementaux lorsque la gestion de l'irrigation est raisonnée. Ceci renforce le besoin de développer une méthode efficace et conviviale de gestion de l'irrigation qui semble demander une certaine spécificité afin d'en tirer le meilleur parti.

7 BIBLIOGRAPHIE

Allaire, 2004. Physique et hydrodynamique des sols, SLS-12420, Notes de cours, Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval.

Allison, L.E. 1965. Organic Carbon. p. 1367-1378. *In* C.A. Black et al. (ed.). Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monograph no. 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.

ARVALIS. 2006. Institut du végétal. Irrinov[®], Guide de l'utilisateur, Carnet de terrain, Pomme de terre.

Boivin, C. et Landry, C.P. 2009. Cibler le stade phénologique optimal pour amorcer l'irrigation en lien avec le gain en pommes de terre et la perte des nitrates. Rapport final DS 6163 remis au Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec et au Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec. 51 pages.

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). 1988. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. Méthode PH-1. Détermination du pH à l'eau. Agdex 533. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Québec, QC.

CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation du Québec. 1^{ère} édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). Ste-Foy, Québec. 293 pages.

CRAAQ. Avril 2010. Pomme de terre de table. Budget – variété tardive. AGDEX 258/821h. 10 p.

DEBERTIN, D.L. 1986. Agricultural Production Economics. Macmillan Publishing Company. 366 p.

FAO, 1998. Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and drainage paper 56

FPPTQ. 2011a. Historique des prix déterminés. [en ligne] <http://www.fpptq.qc.ca/prix.htm> (consulté le 17 juillet 2011).

FPPTQ. 2011b. Modèle de coûts de production. [en ligne] <http://www.fpptq.qc.ca/modele.htm> (consulté le 17 juillet 2011).

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

Giroux, M., N'Dayegamiye, A. et Royer, R. 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):25-34.

Goulet, M. 2001. Science du sol, SLS-12503, Notes de cours, Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval

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

Landry, C.P. 2011. Évaluation de l'efficacité fertilisante en N et P, et de l'ISB de la fraction solide de lisier de porcs conditionnés obtenue du séparateur décanteur centrifuge afin d'en déterminer la valeur économique. Rapport final DS 6186. Québec, 95 pages.

Maynard, D.G. and Kalra, Y.P. 1993. Nitrate and exchangeable ammonium nitrogen. p. 25-38. *In* M.R. Carter (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

McGill, W.B. et Figueiredo, C.T. 1993. Total nitrogen. p. 201-211. *In* M.R. Carter (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.

N'Dayegamiye, A. et Seydoux, S. 2008. Optimiser l'efficacité de l'azote des fumiers. Le producteur de lait québécois. Novembre : 34-36.

Statistiques Canada. 2011. Bulletin de service. Production canadienne de pommes de terre. No 22-008-X au catalogue. [en ligne] <http://www.statcan.gc.ca/pub/22-008-x/22-008-x2011002-fra.pdf> (consulté le 12 juillet 2011).

Topp, G.C., Galganov, Y.T., Ball, B.C. et Carter, M.R. 1993. Soil water desorption curves. p. 569-580. *In* M.R. Carter (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.

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

ANNEXE 1. Photos



Figure 46. Plantation.



Figure 47. Parcelles et station météo.

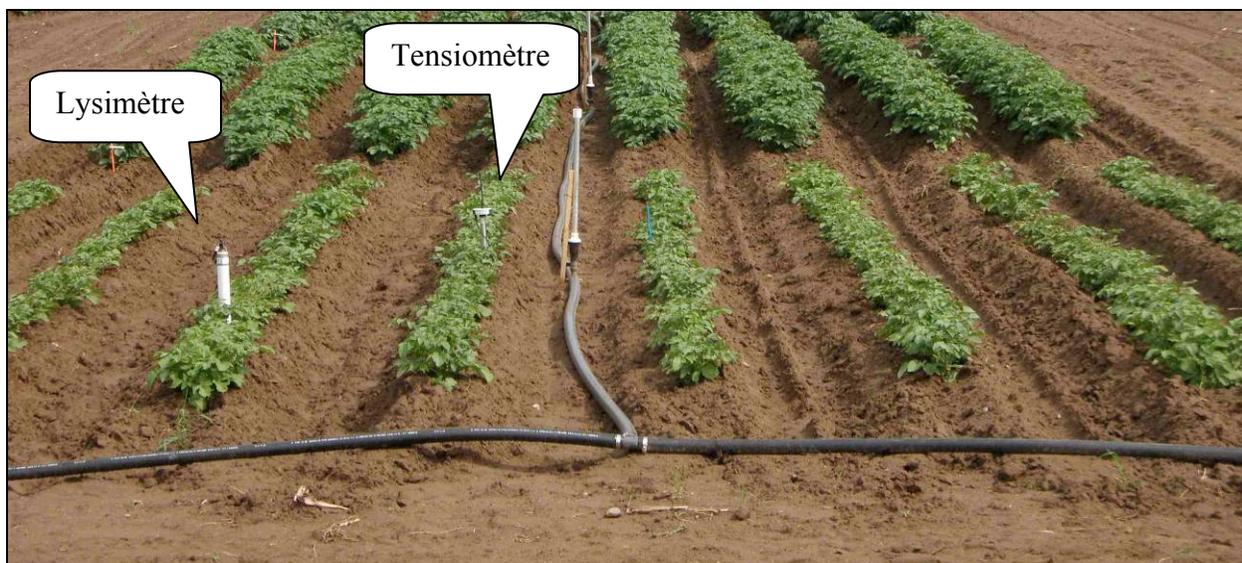


Figure 48. Système d'irrigation, lysimètre et tensiomètre.



Figure 49. Irrigation et pluviomètres (20) pour mesurer l'uniformité d'application.