



Relations entre les nutriments minérale et hydrique: impacts sur la productivité de la pomme de terre et l'utilisation des engrais azotés

Projet # 6592



Rapport final

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

Janvier 2014

Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) s'est engagé à travailler avec des partenaires de l'industrie. Les opinions exprimées dans le présent document sont celles du demandeur et ne sont pas nécessairement partagées par AAC et le CDAQ.

« Une partie du financement de ce projet a été fournie par l'entremise des conseils sectoriels du Québec, de l'Alberta et de l'Ontario qui exécutent le Programme canadien d'adaptation agricole (PCAA) pour le compte d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. »

Équipe de réalisation

IRDA

Christine Landry	Chercheure
Carl Boivin	Chercheur
Luc Belzile	Chercheur
Paul Deschênes	Professionnel de recherche
Michèle Grenier	Statisticienne
Julie Mainguy	Attachée de recherche
Laurence Simard-Dupuis	Attachée de recherche
Danièle Pagé	Technicienne agricole
Stéphane Nadon	Technicien agricole
François Charrier	Technicien agricole

Étudiants d'été

Éloïse Bastien, David Bilodeau, Jessie Caron, Maxime Delisle-Houde, Paul Harrison, Bruno Lavallée, Michaël Lemay, Alain Marcoux, Jean-François Plourde, Julien Vachon et Nicolas Watters.

MAPAQ DRBSL

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

Table des matières

1	SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET	7
1.1	Introduction.....	8
1.2	Objectif général	10
1.3	Objectifs spécifiques.....	10
2	MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	11
2.1	Mise en place de l'expérience.....	11
2.2	Traitements	13
2.3	Dispositif expérimental et analyses statistiques	14
2.4	Analyses physiques et chimiques du sol.....	16
2.5	Développement et nutrition de la pomme de terre.....	16
2.6	Conditions météorologiques et calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETp)	18
2.7	Analyse économique.....	18
3	RÉSULTATS ET ANALYSE	19
3.1	Conditions météorologiques	19
3.2	Mesurer l'impact de l'apport de doses croissantes d'azote, selon la présence ou l'absence d'irrigation, sur la nutrition des plants, leur croissance et la disponibilité du N du sol.....	22
3.2.1	Nutrition des plants	22
3.2.2	Développement des plants	23
3.2.3	Récoltes périodiques des tubercules	24
3.2.4	Prélèvement en N des fanes et des tubercules	28
3.2.5	Prélèvement global en N par la culture.....	29
3.2.6	Disponibilité du N du sol	31
3.2.7	Teneur du sol en N résiduel à la récolte.....	33
3.3	Connaître l'évolution du taux d'utilisation du N de l'engrais durant la saison selon la dose de N apportée, avec et sans irrigation.....	35
3.4	Détailler l'évolution tout au long de la saison de l'atteinte des différents stades phénologiques du cultivar Goldrush selon la fertilisation et l'absence ou la présence d'irrigation.	37
3.5	Déterminer si l'irrigation modifie la dose de N qui permet un rendement optimal.	39
3.6	Déterminer à quel point la fertilisation croissante en N modifie la demande en eau pour une consigne de déclenchement de l'irrigation donnée (50 % de la réserve utile).....	40
3.7	Évaluer les bénéfices économiques potentiels à tirer de la synergie entre la fertilisation N et l'irrigation. Soit déterminer la fonction de production de pommes de terre afin d'évaluer la combinaison d'intrants optimale, soit la combinaison d'irrigation et de fertilisation azotée qui maximise le profit du producteur.	41
3.8	Influence du taux de matière organique du sol sur le poids en tubercules et la qualité de ces derniers selon l'apport ou non d'irrigation	44
3.8.1	Poids en tubercules	44
3.8.2	Poids spécifique des tubercules	47
4	CONCLUSION.....	48
5	BIBLIOGRAPHIE.....	50
6	DIFFUSION DES RÉSULTATS	53

Liste des figures

Figure 1. Système d'irrigation par aspersion, été 2011.	13
Figure 2. Plan du dispositif expérimental en 2011 et 2012.....	15
Figure 3. Pluviométrie (mm) et température minimale, maximale et moyenne (°C) mesurées quotidiennement - 2011.	20
Figure 4. Pluviométrie (mm) et température minimale, maximale et moyenne (°C) mesurées quotidiennement - 2012.	20
Figure 5. Évapotranspiration potentielle (ETp) calculée quotidiennement (mm) - 2011.	21
Figure 6. Évapotranspiration potentielle (ETp) calculée quotidiennement (mm) - 2012.	21
Figure 7. Teneur en N _{tot} dans la 4 ^e feuille mature des plants de pommes de terre en 2011 et 2012 au stade bouton et pleine floraison. Les colonnes pour une même date ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$	22
Figure 8. Évolution de la masse sèche des plants en cours de saison 2011.....	23
Figure 9. Évolution de la masse sèche des plants en cours de saison 2012.....	24
Figure 10. Poids total en tubercules (t ha ⁻¹) selon la date et la dose de N (kg ha ⁻¹) sans apport en eau par l'irrigation, saison 2011.	26
Figure 11. Poids total en tubercules (t ha ⁻¹) selon la date et la dose de N (kg ha ⁻¹) avec apport en eau par l'irrigation, saison 2011.	26
Figure 12. Poids total en tubercules (t ha ⁻¹) selon la date et la dose de N (kg ha ⁻¹) sans apport en eau par l'irrigation, saison 2012.	26
Figure 13. Poids total en tubercules (t ha ⁻¹) selon la date et la dose de N (kg ha ⁻¹) avec apport en eau par l'irrigation, saison 2012.	26
Figure 14. Poids total en tubercules (t ha ⁻¹) selon la date, avec et sans apports en eau par l'irrigation, saison 2011.	27
Figure 15. Poids total en tubercules (t ha ⁻¹) selon la date, avec et sans apports en eau par l'irrigation, saison 2012.	27
Figure 16. Prélèvements en N des fanes et tubercules en cours de saison 2011.....	28
Figure 17. Prélèvements en N des fanes et tubercules en cours de saison 2012.....	29
Figure 18. Prélèvements globaux en N par la culture en cours de saison 2011.....	30
Figure 19. Prélèvements globaux en N par la culture en cours de saison 2012.....	30
Figure 20. Contenu en N sous forme de nitrate dans la couche 0-30 cm de sol en cours de saison 2011.	32
Figure 21. Contenu en N sous forme de nitrate dans la couche 0-30 cm de sol en cours de saison 2012.	32
Figure 22. Contenu en nitrate résiduel dans la couche 0-30 cm de sol selon le taux de fertilisation N et la régie d'irrigation à la récolte en 2011.	34
Figure 23. Contenu en nitrate résiduel dans la couche 0-30 cm de sol selon le taux de fertilisation N et la régie d'irrigation à la récolte en 2011.	34
Figure 24. Impact du taux de fertilisation azoté sur les rendements vendables en 2011 et 2012.	39
Figure 25. Poids en tubercules (t ha ⁻¹) selon la dose de N (kg ha ⁻¹), le taux de MO du sol (%) sans apport en eau par l'irrigation, saison 2011.	45
Figure 26. Poids en tubercules (t ha ⁻¹) selon la dose de N (kg ha ⁻¹), le taux de MO du sol (%) avec apport en eau par l'irrigation, saison 2011.	45

Figure 27. Poids en tubercules ($t\ ha^{-1}$) selon la dose de N ($kg\ ha^{-1}$), le taux de MO du sol (%) sans apport en eau par l'irrigation, saison 2012.	46
Figure 28. Poids en tubercules ($t\ ha^{-1}$) selon la dose de N ($kg\ ha^{-1}$), le taux de MO du sol (%) avec apport en eau par l'irrigation, saison 2012.	46
Figure 29. Poids spécifique moyen des tubercules selon la dose de N ($kg\ ha^{-1}$), le taux de MO du sol (%) sans apport en eau par l'irrigation, saison 2012.	47
Figure 30. Poids spécifique moyen des tubercules selon la dose de N ($kg\ ha^{-1}$), le taux de MO du sol (%) avec apport en eau par l'irrigation, saison 2012.	47

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractérisation du sol.	11
Tableau 2. Dates des principales opérations culturales selon la saison.	11
Tableau 3. Description des traitements à l'étude.	14
Tableau 4. Coefficient d'utilisation apparente (CUA) du N des engrais selon la fertilisation azotée pour les saisons 2011 et 2012.	36
Tableau 5. Impact du taux de fertilisation azotée sur l'atteinte des stades phénologiques de la culture de pommes de terre en 2011.	37
Tableau 6. Impact du taux de fertilisation azotée sur l'atteinte des stades phénologiques de la culture de pommes de terre en 2012.	38
Tableau 7. Nombre d'épisodes d'irrigation effectué en 2011 et 2012 selon le traitement et la période.	40
Tableau 8. Taux optimaux d'application d'azote en fonction des prix de la pomme de terre et de l'engrais azoté.	43

1 SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET

L'azote (N) a la particularité de ne pas se fixer aux particules de sol et le mouvement de cet élément est tributaire de l'eau. Cette situation entraîne, entre autres, une diminution de l'efficacité d'utilisation des engrais azotés et une augmentation du risque de perdre les nitrates par lessivage. Ce projet avait comme objectif de détailler l'interaction entre la nutrition azotée et hydrique de la pomme de terre. Les essais ont été réalisés à la Station de recherche de Deschambault en 2011 et 2012. Le cultivar de pomme de terre Goldrush a été soumis à 10 combinaisons de traitements, soit 5 doses de N ha^{-1} (0, 50, 100, 150 et 200 kg) avec ou sans apports en eau par l'irrigation (consigne à 50 % de la réserve utile en eau du sol). En ce qui a trait à la nutrition azotée des plants, au développement de ces derniers et au rendement vendable, il n'y a eu aucun avantage à dépasser la dose de 100 kg N ha^{-1} , exception faite du rendement vendable de 2011 qui a été maximal au taux de 150 kg N ha^{-1} . Les prélèvements en N par les plants et les tubercules ont plafonné vers 73 jours après la plantation, ce qui indique que l'essentiel du développement était réalisé à ce moment. De plus, les teneurs en N-NO_3 dans le sol ont atteint, les deux années, leurs valeurs les plus basses au moment où les prélèvements ont plafonné. Le meilleur coefficient d'utilisation du N a été mesuré avec la dose de 100 kg N ha^{-1} , soit 73 % (2011) et 71 % (2012). Ce taux a diminué à 55 % (2011) et 46 % (2012) avec la dose de 200 kg N ha^{-1} . L'irrigation n'a pas eu d'impact sur le poids total en tubercules en 2011. Toutefois pour 2012, une différence significative a été favorable aux parcelles qui ont reçu des apports en eau, toutes doses de N confondues. De plus, l'irrigation n'a pas modifié la dose économiquement optimale de N à apporter. Cette dernière est près de 185 kg N ha^{-1} les deux années. Cependant, la fertilisation N a modifié la demande en eau. La consigne de déclenchement a été atteinte plus souvent avec la fertilisation de 200 kg N ha^{-1} . Les plants recevant cette dose de N ont donc reçu davantage d'épisodes d'irrigation. Enfin, le taux de matière organique (M.O.) dans le sol semble avoir eu un impact sur le poids total en tubercules et sur les bénéfices tirés de l'irrigation, surtout lors d'une saison propice aux stress hydriques. En effet, en 2012, dans les sols plus pauvres en M.O. (inférieur à 1,4 % versus supérieur à 1,6 %), le poids total en tubercules était plus élevé et plus uniforme dans les parcelles irriguées, avec un nombre plus élevé de parcelles ayant produit entre 15 et 30 t ha^{-1} . Une tendance similaire a été observée avec le poids spécifique. Enfin, ce projet met en évidence les avantages de maintenir le sol dans de bonnes conditions, puisque sa contribution en N peut s'avérer très significative, plus du quart de la dose économique optimale dans ce cas-ci. De plus, en absence d'irrigation, les parcelles avec le plus haut taux de M.O. ont mieux performées. Des pratiques culturales assurant sur le long terme la santé des sols peuvent contribuer à diminuer la consommation d'intrants et, incidemment, l'impact négatif que pourrait avoir de la culture sur le milieu.

DESCRIPTION DU PROJET

1.1 Introduction

Le Canada est un important pays producteur de pommes de terre, avec une production annuelle de 4,28 millions de tonnes métriques (FPPTQ 2010a). En 2010, à eux seuls, l'Île-du-Prince-Édouard, le Nouveau-Brunswick et le Québec regroupaient 74 000 ha en culture (Statistiques Canada 2010). Considérant une fertilisation moyenne recommandée (CRAAQ 2003), ces superficies reçoivent 13 millions de kilos d'azote (N). L'apport de N dans le milieu récepteur est donc très important et cette charge est d'autant plus difficile à gérer que la pomme de terre est cultivée en sol sableux, très drainant. Étant donné que le N a la particularité de ne pas se fixer aux particules de sol et que son transport dans le sol est contrôlé par le mouvement de l'eau, ceci génère une problématique de baisse d'efficacité des engrais azotés et de perte des nitrates. Le taux d'utilisation du N des engrais par la pomme de terre est d'ailleurs reconnu pour être faible, rarement de 60 % et pouvant s'abaisser dans les 30 % lorsque les conditions climatiques ou de sol sont défavorables (Gasser et Laverdière 2000, CRAAQ 2003). Ces chiffres sont corroborés par les résultats de projets réalisés depuis 2007 dans la région de la Capitale-Nationale (Boivin et Landry 2008; Boivin et Landry 2011; Landry 2011; Boivin et Landry 2012), réalisés dans la région de Portneuf en sols sableux. Ces projets ont en effet démontré que l'engrais azoté présentait, en moyenne, des taux d'utilisation de moins de 60 %. De plus, ils ont révélé que les excès d'eau, qu'ils soient naturels (pluie) ou engendrés par l'irrigation, entraînaient non seulement une baisse du taux d'utilisation du N des engrais sous les 50 %, mais faisaient également diminuer de plusieurs tonnes par hectare les rendements. Les excès d'eau faisaient aussi augmenter jusqu'à cinq fois la concentration en nitrates des eaux de lessivage durant la saison de croissance. Ces constats sont d'autant plus préoccupants que (1) les superficies en production de pommes de terre au Canada sont très importantes, (2) que la pratique de l'irrigation est en croissance et (3) que le coût des engrais N est en hausse puisque son prix suit, entre autres, le cours du pétrole. La Fédération des producteurs de pommes de terre du Québec (FPPTQ) présente d'ailleurs un plan d'intervention priorisant la fertilisation intégrée et considérant comme prioritaire la diminution des risques de pollution diffuse du N (FPPTQ 2010b) par une meilleure connaissance du potentiel agronomique des pratiques culturales.

D'importantes conséquences économiques peuvent en effet découler d'une gestion non intégrée de la fertilisation azotée. La baisse de rentabilité peut être très significative puisque la dépense la plus importante encourue par les producteurs est les coûts de fertilisation qui varient entre 17 % et 21 % des coûts variables et entre 12 % et 16 % des charges totales d'exploitation (Fortier et coll. 2010). Sur une ferme modèle de 104 ha, fertilisant les champs au taux de 175 kg N ha⁻¹ au prix de 2 \$ kg⁻¹ de N, une dépense de 36 400 \$ sera encourue uniquement pour l'engrais N, sans compter les dépenses et le temps requis pour son application. La détermination de la combinaison optimale d'irrigation et de fertilisation est donc susceptible de procurer des gains financiers substantiels aux producteurs de pommes de terre. Au niveau environnemental, pour cette même ferme de 104 ha, si le taux d'utilisation du N est de 55 %, ceci signifie que 8190 kg des 18 200 kg appliqués ne sont pas prélevés par la culture et se retrouvent dans le milieu récepteur. Ce N peut ensuite migrer vers les eaux souterraines et de surface. Il existe d'ailleurs plusieurs publications qui démontrent clairement qu'il y a lessivage intensif des

nitrate sous production commerciale de pommes de terre (Richards et coll. 1990), avec ses implications sur la qualité de l'eau potable et la santé humaine (Kenney et Hatfield 2001). Par exemple, au Québec, Giroux (2003) rapporte que suivant la campagne d'échantillonnage réalisée entre 1999-2001 des eaux des puits des régions productrices de pommes de terre, 42 % des puits testés avaient une concentration en nitrates qui excédait la norme de $10 \text{ mg L}^{-1} \text{ N-NO}_3$ pour l'eau potable. En fait, le lessivage des nitrates est le principal mécanisme par lequel se perd le N en production de pommes de terre (Zebarth et Rosen 2007). Les estimations de quantités de nitrates lessivés de diverses régions productrices de pommes de terre vont de 10 à 200 $\text{kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ (ex. Milburn et coll. 1990; Errebhi et coll. 1998). Au Québec, Gasser et coll. (2002) ont rapporté des valeurs de lessivage de $116 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$. Aux nitrates lessivés durant l'année d'application s'ajoutent ceux provenant des nitrates résiduels post-récolte (saison précédente). Ces nitrates, laissés au sol après la saison de production, sont très sensibles au lessivage lors des grandes pluies d'automne ou au printemps suivant la fonte des neiges. Ainsi, dans les climats humides tels que ceux dans l'Est du Canada, la réduction des nitrates résiduels est un important facteur de limitation de la migration du N en profondeur dans les profils de sol (Bélanger et coll. 2003). Une fertilisation N optimisée permettrait donc également de faire diminuer ces reliquats d'azote post-récolte.

Il apparaît donc pertinent de bien caractériser la dynamique de l'utilisation du N par la pomme de terre, dès le début de la saison, et ce, jusqu'à la récolte. De même, les producteurs bénéficieront de l'approfondissement des connaissances sur la relation existant entre la fertilisation azotée et l'irrigation, afin de pouvoir tirer parti de la synergie qui existe entre le N et la teneur en eau du sol qui conditionne son transport dans le sol et, incidemment, son absorption par la culture ou son lessivage.

1.2 Objectif général

Détailler l'interaction entre la nutrition azotée et hydrique de la pomme de terre afin d'avoir les outils nécessaires pour maximiser l'emploi du N et la rentabilité du secteur tout en diminuant la pression sur l'environnement.

1.3 Objectifs spécifiques

1. Mesurer l'impact de l'apport de doses croissantes d'azote, selon la présence ou l'absence d'irrigation, sur la disponibilité du N du sol, la nutrition des plants et leur croissance.
2. Connaître l'évolution du taux d'utilisation du N de l'engrais durant la saison selon la dose de N apportée, avec et sans irrigation.
3. Détailler l'évolution tout au long de la saison de l'atteinte des différents stades phénologiques du cultivar Goldrush selon la fertilisation et l'absence ou la présence d'irrigation.
4. Déterminer si l'irrigation modifie la dose de N qui permet un rendement optimal.
5. Déterminer à quel point la fertilisation croissante en N modifie la demande en eau pour une consigne de déclenchement de l'irrigation donnée (50 % de la réserve utile).
6. Évaluer les bénéfices économiques potentiels à tirer de la synergie entre la fertilisation N et l'irrigation. Soit déterminer la fonction de production de pommes de terre afin d'évaluer la combinaison d'intrants optimale, soit la combinaison d'irrigation et de fertilisation azotée qui maximise le profit du producteur.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 Mise en place de l'expérience

Les essais terrain de cette étude se sont échelonnés sur deux ans à la Station de recherche de Deschambault, du printemps 2011 à l'automne 2012, dans un sol de type sable loameux dont les caractéristiques sont présentées au Tableau 1. Les dates des principales opérations culturales sont présentées au Tableau 2. Des tubercules entiers, du cultivar Goldrush, certifiés Élite-4, de calibre 1-1/2 à 8 oz, ont été tranchés et plantés à une densité de 32 584 plants ha⁻¹. Le calibre des plantons était de 1-1/2 à 4 oz. L'espace entre les plantons était de 0,33 m et celui entre les rangs était de 0,93 m.

Tableau 1. Caractérisation du sol.

Paramètres [†]	2011
pH _{eau}	6,14
Matières organiques (M.O.) (%)	1,12
N _{tot} (mg kg ⁻¹ b.s.)	640
Éléments Mehlich-3 (mg kg ⁻¹ b.s.)	
P	204
K	94
Ca	565
Mg	23
Al	1076
P/Al (%)	19

Tableau 2. Dates des principales opérations culturales selon la saison.

	Années	
	2011	2012
Fertilisation de départ et plantation (N, P, K)	1 ^{er} juin	14 mai
Fertilisation au fractionnement (N)	8 juillet	28 juin
Défanage	16 septembre ¹	29 août
Récolte	19 octobre	25 septembre

¹ Les plants étaient défanés sans utilisation de produit au 16 septembre.

Les engrais minéraux 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. 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 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.

Par la suite, peu avant l'émergence des plants, le système d'irrigation par aspersion a été mis en place (Figure 1). 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) 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.



Figure 1. Système d'irrigation par aspersion, été 2011.

2.2 Traitements

La présente étude comparait dix traitements, incluant deux consignes d'irrigation (non irrigué et irrigué à 50 % de la RU) et cinq doses de N, dont des témoins non fertilisés, irrigués ou non, afin de pouvoir évaluer la fourniture naturelle en N du site et l'impact de l'irrigation sur cette fourniture (Tableau 3). Un épisode d'irrigation était déclenché dès que la valeur de la tension de l'eau dans le sol mesurée par le tensiomètre atteignait la consigne de déclenchement. Cette consigne a été fixée à 50 % de la réserve utile en eau du sol (RU). Dans un projet réalisé avec la Russet Burbank, cette consigne a été identifiée dans Boivin et Landry (2011) comme étant celle ayant permis de maximiser les gains économiques et environnementaux, par rapport à un témoin non irrigué et une consigne où la RU était maintenue à 65 % de la RU. La valeur de tension y correspondant a été déterminée avec la courbe de désorption en eau de ce sol. Enfin, la durée d'un épisode d'irrigation a été ajustée selon la profondeur d'enracinement durant la saison.

Tableau 3. Description des traitements à l'étude.

No traitement	kg N/ha		Irrigation	Traitement (nom)
	Plantation	Fractionnement		
1	0	0	Non	0N-I ₀
2	0	0	Oui	0N-I _{50%}
3	50	0	Non	50N-I ₀
4	50	0	Oui	50N-I _{50%}
5	50	50	Non	100N-I ₀
6	50	50	Oui	100N-I _{50%}
7	75	75	Non	150N-I ₀
8	75	75	Oui	150N-I _{50%}
9	100	100	Non	200N-I ₀
10	100	100	Oui	200N-I _{50%}

2.3 Dispositif expérimental et analyses statistiques

Un dispositif à parcelles partagées de 4 blocs aléatoires complets constitués de 2 parcelles principales et 5 sous-parcelles, soit 40 parcelles au total, a été mis en place au champ (Figure 2). Les deux traitements d'irrigation ont été attribués aux parcelles principales en blocs aléatoires complets et les cinq doses de N ont été assignées de façon complètement aléatoire aux sous-parcelles.

Une analyse de la variance a été réalisée pour chacune des variables à l'étude afin d'étudier les effets des traitements d'irrigation et des doses de fertilisant sur ces variables. Un modèle mixte normal a été ajusté avec la procédure PROC MIXED de SAS (Littell et coll. 2006). Les effets fixes étaient le mode d'irrigation, la dose de N et l'interaction Irrigation×Dose N. Les effets aléatoires étaient les blocs et l'interaction Bloc×Irrigation. Pour certaines variables, des mesures ont été effectuées au cours de plusieurs dates, de sorte que les effets fixes des dates et des interactions Date×Irrigation, Date×Dose N et Date×Irrigation×Dose N, ont été ajoutés au modèle. L'effet aléatoire Bloc×Irrigation×Dose N a dû également être ajouté et une matrice de variance-covariance a été modélisée afin de tenir compte des corrélations entre les mesures répétées à des dates successives sur les mêmes parcelles. Les degrés de liberté ont été calculés avec l'approximation de Satterthwaite. Dans tous les cas, une analyse graphique des résidus a servi à vérifier les hypothèses sous-jacentes à la validité du modèle. Lorsque l'effet d'un facteur ou d'une interaction était déclaré significatif par le test de F, les différences entre les moyennes ont été explorées au moyen de tests de t. Les contrastes pour étudier les effets linéaires et quadratiques de la dose ont également été effectués.

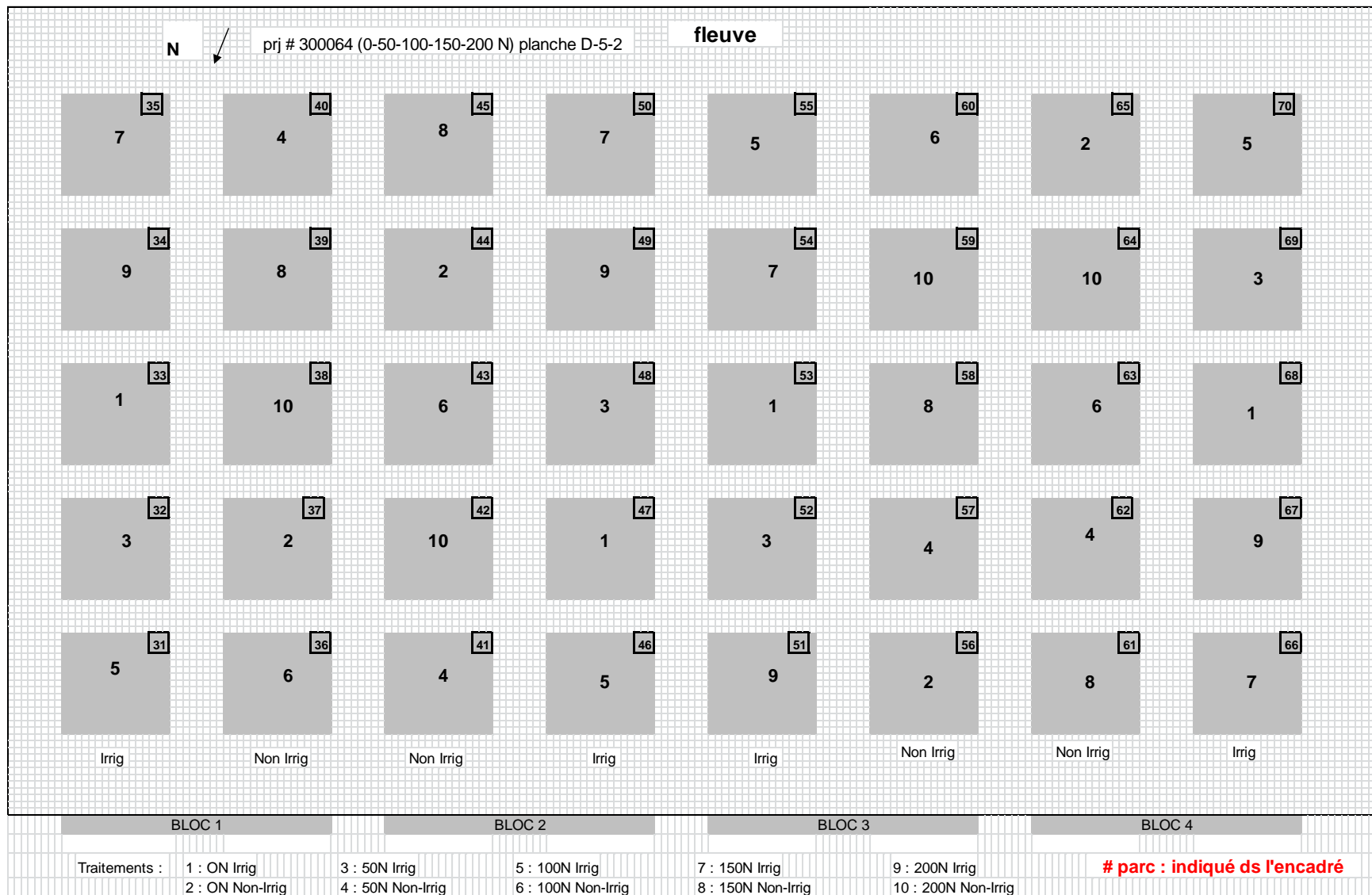


Figure 2. Plan du dispositif expérimental en 2011 et 2012.

2.4 Analyses physiques et chimiques du sol

Les analyses de sol ont toutes été réalisées sur des échantillons composites de dix sous-échantillons, prélevés dans la strate de sol 0-30 cm, sauf celle de la masse volumique apparente (MVA) qui a été établie en triplicata. À chacune des années, lors de l'établissement du site, les échantillons servant à la caractérisation du sol du dispositif expérimental étaient prélevés dans la strate de sol 0-30 cm afin de déterminer le pH_{eau} , les éléments majeurs Mehlich-3 et d'évaluer le taux (%) de C et N totaux du sol (C_{tot} et N_{tot}). Par la suite, des échantillons ont été prélevés dans chacune des parcelles à 6 reprises pour doser le N minéral (N_{min}): avant fractionnement, au stade 50-75 % de floraison, début août, mi-août, au défanage et à la récolte. Lors de la récolte finale, les contenus en C_{tot} et N_{tot} ont aussi été mesurés. 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. Les valeurs obtenues ont été rapportées en kg ha^{-1} sur base sèche (b.s.) en utilisant la MVA mesurée simultanément par l'insertion de cylindre de cuivre au sol. Le sol des cylindres a ensuite été séché à 105 °C afin d'en retirer l'eau puis pesé. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points 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). Les contenus en C_{tot} et N_{tot} ont été mesurés par combustion au Leco. Le N minéral (N_{min}) sous forme de nitrate (N-NO_3) a été extrait au KCl 2M (Isaac et Johnson 1976) et déterminé par colorimétrie au Technicon AA-II. Le phosphore (P), le potassium (K) et les éléments mineurs ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et Simard 1993) et dosés à l'ICP optique. 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 du sol (Topp et coll. 1993).

2.5 Développement et nutrition de la pomme de terre

Tout au long de la saison, l'atteinte des stades phénologiques a fait l'objet d'un suivi constant. Les stades visés sont ceux recommandés par le Réseau d'avertissement phytosanitaire selon la référence de Sparks (1982). Les stades 0 à 8 correspondent aux étapes de développement suivantes : émergence, différenciation des plants, boutons floraux, boutons floraux pédonculés début floraison, pleine floraison, fin floraison, plant adulte et plant sénescent.

L'analyse du N_{tot} de la 4^e feuille mature, reconnue comme un indicateur nutritionnel fiable dans la culture de la pomme de terre, a été réalisée à deux reprises en cours de saison, soit aux stades pré-fractionnement et 50-75 % de floraison. Dans chacune des parcelles, dix feuilles ont été prélevées en avant-midi, car il est reconnu que le contenu en nitrate des plantes est très affecté par la quantité de lumière. Les échantillons ont été conservés dans une glacière à 4 °C jusqu'à leur réception au laboratoire. Les folioles ont alors été séchées à 65 °C et broyées à 100 mesh. Le N_{tot} a ensuite été extrait selon la méthode Kjeldahl (Isaac et Johnson 1976) et dosé par colorimétrie automatisée sur autoanalyseur Technicon AA-II.

À cinq reprises durant la saison, soit aux stades pré-fractionnement, 50-75 % de floraison, début août, mi-août, défanage et récolte, trois plants (fanés) par parcelles ont aussi été prélevés pour suivre l'évolution de la masse sèche (MS) et des prélèvements en N de la biomasse aérienne. Pour se faire, la MS des plants étaient pesée après un séchage de 48 h à 65 °C. Suivant leur

séchage, la teneur en N_{tot} des plants était déterminée tel que décrit pour les folioles. Les prélèvements de N_{tot} de la biomasse aérienne ont ensuite été calculés comme suit :

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

De plus, à cinq moments durant la saison, soit aux stades 50-75 % de floraison, début août, mi-août, défanage et récolte, une récolte périodique des tubercules a été effectuée. Le but de ces récoltes n'est pas de déterminer un rendement à l'hectare, mais de mieux caractériser le développement des tubercules en cours de saison. Ces récoltes permettent aussi d'avoir un portrait plus global des prélèvements en N à ces stades de production en permettant d'additionner les prélèvements des fanes à ceux des tubercules. Ainsi, lors de ces récoltes, la production totale en tubercules des trois plants consécutifs récoltés a été mesurée et les tubercules classés selon leur poids unitaires. Un échantillon composite de tubercules sains, non pelés et nettoyés, a ensuite été prélevé, découpé en bâtons, mis à sécher à 65 °C et broyé à 100 mesh. Le N_{tot} a ensuite été extrait et dosé tel que décrit pour les folioles. Les prélèvements en N_{tot} ont ensuite été calculés comme suit :

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

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

En fin de saison, une récolte sur une surface beaucoup plus importante, soit huit mètres linéaires (quatre mètres linéaires sur deux rangs), a aussi été effectuée afin d'établir les rendements totaux et vendables à l'hectare. Les tubercules ont été classés par calibre selon les normes de l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) pour les pommes de terre de type long (Canada #1 : diam. > 51 mm et < 89 mm, Canada #1 grosses : diam. > 89 mm et < 114 mm) (ACIA 2013). Par la suite, 25 tubercules ont été prélevés de façon aléatoire dans chacun des lots récoltés. Chacun des tubercules a été évalué pour déterminer un indice pour la rhizoctonie, tenant compte à la fois de la sévérité des symptômes de cette maladie et du pourcentage de recouvrement de ceux-ci sur les tubercules. D'autre part, le poids spécifique a été mesuré à partir d'un sous-échantillon de 3 kg de tubercules par parcelle. Le sous échantillon a d'abord été pesé (poids dans l'air). Les tubercules ont ensuite été plongés dans l'eau et le poids noté à nouveau (poids dans l'eau). Le poids spécifique est le résultat de la division du poids dans l'air par la différence entre le poids dans l'air et celui dans l'eau. Par ailleurs, un échantillon composite de cinq tubercules sains, non pelés et nettoyés, a été prélevé dans chacune des parcelles, puis préparé et analysé pour la teneur en N_{tot} tel que décrit pour les récoltes périodiques. Cette information a servi au calcul des exportations en N_{tot} de la culture. Elle a aussi permis d'établir le prélèvement total en N pour la saison:

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

$$PVL N_{tot} \text{ total} = EXP N_{tot} + PVL N_{tot} \text{ plant défanage}$$

Une fois les PVL totaux 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 fournit 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 (fertilisée, non irriguée), testée en même temps, dont

l'efficacité est la mesure étalon. En effet, bien que le CUA du N des engrais minéraux ne soit jamais de 100 %, le taux d'utilisation qu'ils atteignent est considéré comme étant le plus haut taux possible. Leur efficacité fertilisante est donc par défaut considérée égale à 100 %. Le CUA et le CE sont donc calculés selon l'équation suivante (Giroux et coll. 2007) utilisant pour l'exemple le traitement ayant reçu 150 kg N ha⁻¹ et non irrigué:

$$(1) \text{ CUA N des engrais (\%)} = \frac{\text{PVL}_{\text{tot}} \text{ N traitement } 150\text{N-I}_0 - \text{PVL}_{\text{tot}} \text{ N témoin } 0\text{N-I}_0}{\text{Dose de N apportée en engrais minéral pour } 150\text{N-I}_0}$$

$$(2) \text{ CE (\%)} = \frac{\text{CUA } 150\text{N-I}_{50\%}}{\text{CUA } 150\text{N-I}_0}$$

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

2.6 Conditions météorologiques et calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETp)

Une station météorologique était située sur le site et cette dernière a mesurée la température et l'humidité relative (HC2-S3, Campbell Scientific), la radiation solaire (LI-200SZ, LI-COR), la vitesse et la direction du vent (Wind monitor, Young Model 05103-10), ainsi que la pluviométrie (TE525WS, Campbell Scientific). Les données ont été enregistrées chaque heure avec un acquiiseur de données CR1000 (Campbell Scientific). L'équation utilisée pour calculer l'évapotranspiration potentielle (ETp) est celle de Penman-Montheith (ASCE 2005).

2.7 Analyse économique

La méthodologie ayant trait à l'analyse économique a été incluse avec les résultats afin d'en améliorer la compréhension (section 3.7).

3 RÉSULTATS ET ANALYSE

3.1 Conditions météorologiques

La pluviométrie et la température minimale, maximale et moyenne ont été mesurées quotidiennement en 2011 et 2012 (Figure 3 et Figure 4) de même que les valeurs quotidiennes d'évapotranspiration potentielle (ETp), calculées avec les données issues de la station météorologique (Figure 5 et Figure 6). La valeur d'ETp est une indication en termes de hauteur d'eau (mm) dans le sol qui est perdue via l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration de l'eau par la plante. Le volume d'eau perdu est fonction de l'intensité des conditions météorologiques. À partir du moment où la demande en ETp excède ce que la plante peut facilement utiliser, cette dernière peut se retrouver en situation de stress hydrique et thermique.

Lorsque les valeurs d'ETp quotidiennes des deux saisons sont comparées, il appert que le nombre de journées où la plante risque de subir un stress hydrique est supérieur en 2012. Globalement, le nombre de jours où la demande en ETp était située entre 2 et 4 mm est plus élevé en 2012. De plus, à partir de la mi-juillet, le nombre de jours où l'ETp était situé entre 4 et 6 mm est aussi plus grand en 2012. Enfin, les épisodes de pluie ont été quasi absents en juillet 2012.

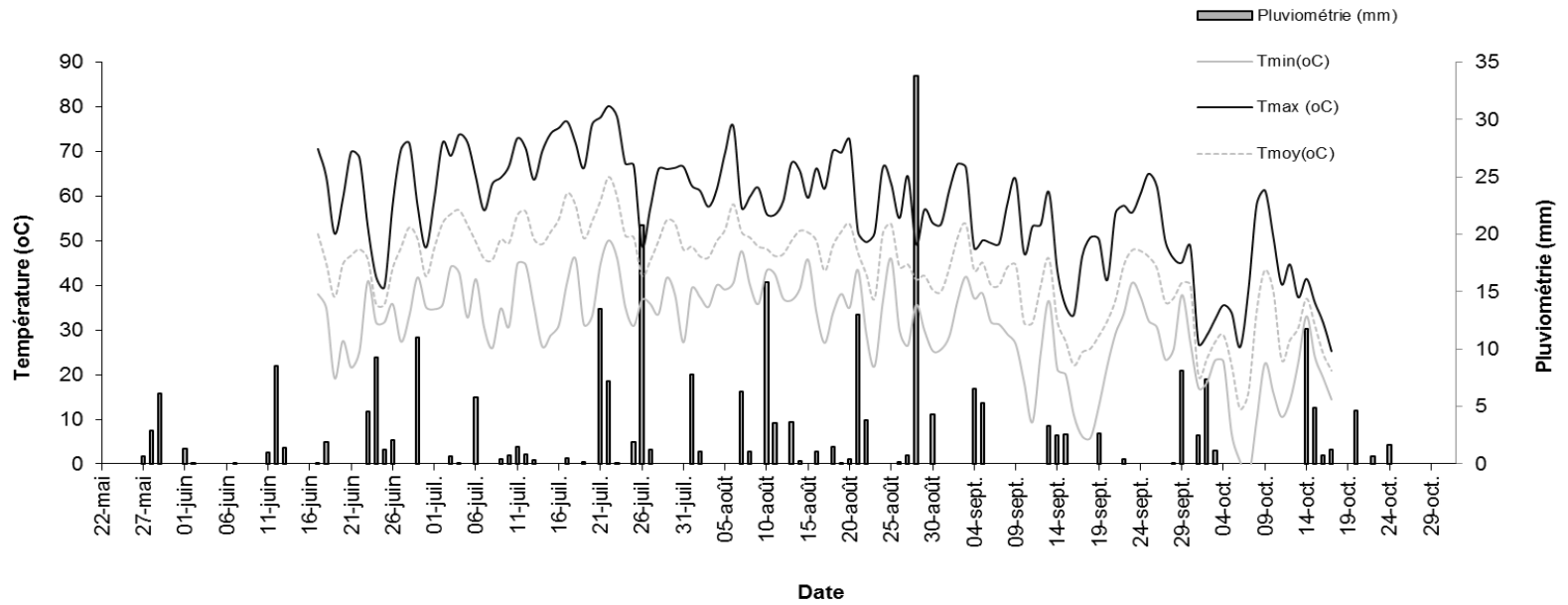


Figure 3. Pluviométrie (mm) et température minimale, maximale et moyenne (°C) mesurées quotidiennement - 2011.

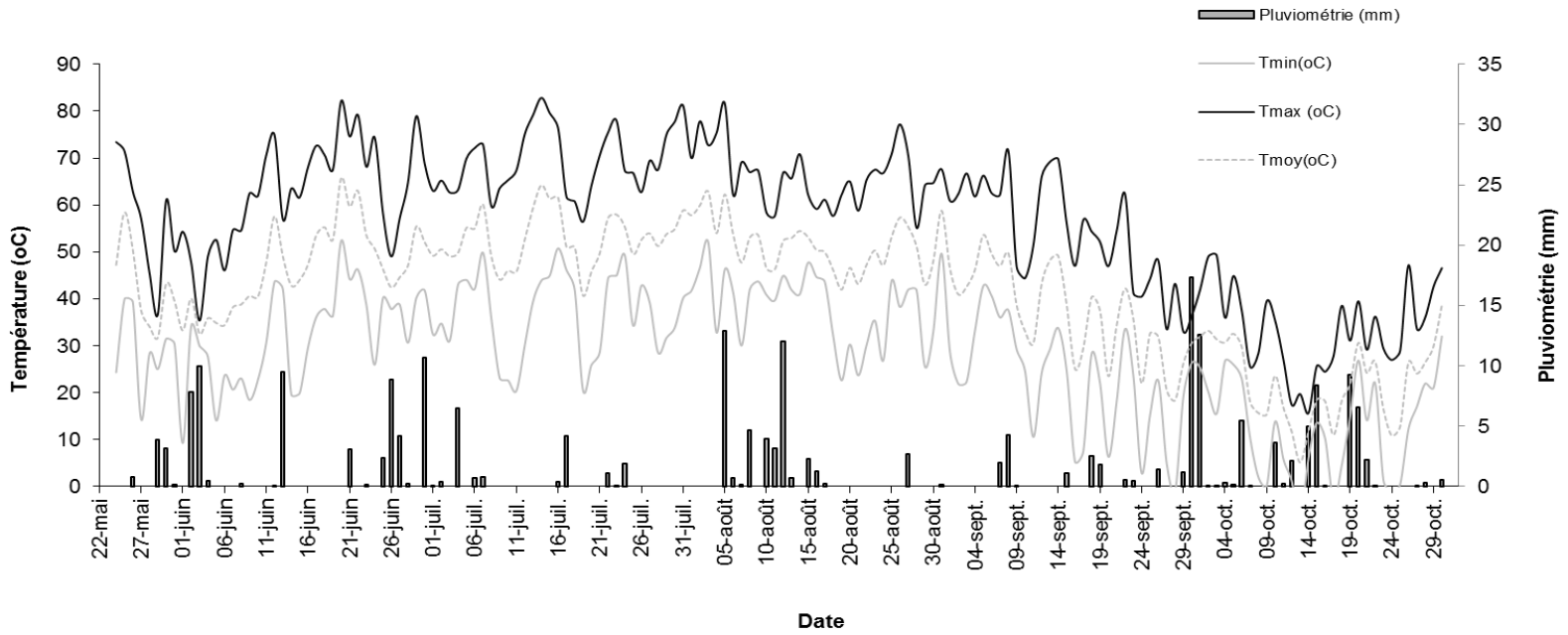


Figure 4. Pluviométrie (mm) et température minimale, maximale et moyenne (°C) mesurées quotidiennement - 2012.

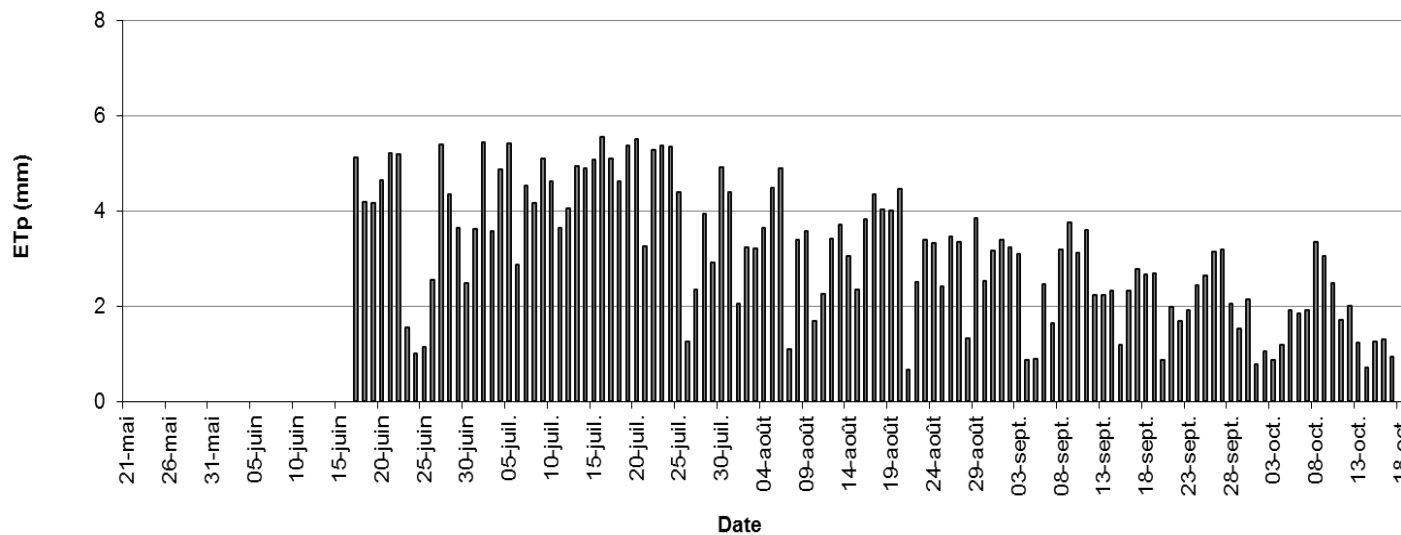


Figure 5. Évapotranspiration potentielle (ETp) calculée quotidiennement (mm) - 2011.

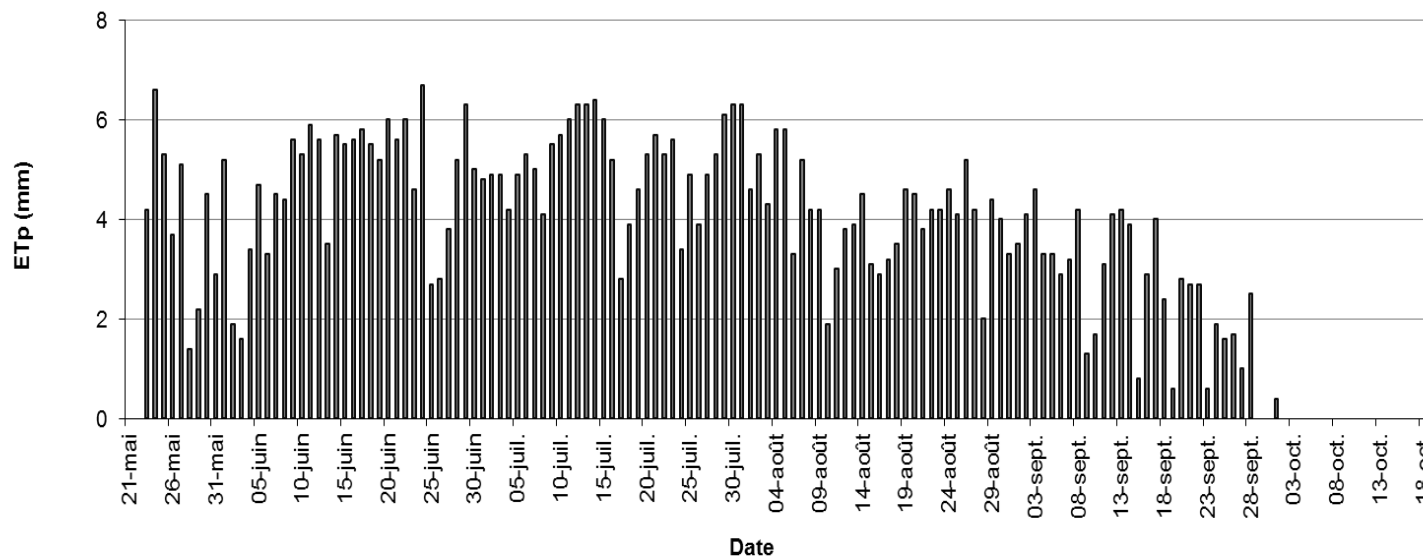


Figure 6. Évapotranspiration potentielle (ETp) calculée quotidiennement (mm) - 2012

3.2 Mesurer l'impact de l'apport de doses croissantes d'azote, selon la présence ou l'absence d'irrigation, sur la nutrition des plants, leur croissance et la disponibilité du N du sol.

3.2.1 Nutrition des plants

Tel qu'attendu, la fertilisation azotée a fortement influencé la nutrition N des plants de pommes de terre, les deux années, tant au stade bouton (Interaction Dose x Date $P = 0,0009$), que pleine floraison (Interaction Dose x Date $P < 0,0001$) (Figure 7). Pour les deux saisons, au stade bouton (7 juillet 2011 et 22 juin 2012), soit avant le fractionnement de N, la teneur en N foliaire a été significativement augmentée dès la dose de 50 kg N ha⁻¹. Par contre, il n'y a pas eu de gain à apporter plus de 75 kg N ha⁻¹ à la plantation. Au stade pleine floraison, soit après l'apport de N au fractionnement, la dose de 50 kg N ha⁻¹ n'a pas permis un meilleur statut nutritionnel azoté que le sol non fertilisé. De plus, les doses de 100, 150 et 200 kg N ha⁻¹ ont donné le même résultat. Au niveau de l'atteinte du seuil de suffisance en N de la pomme de terre, la dose totale de 100 kg N ha⁻¹ a donc été suffisante les deux années.

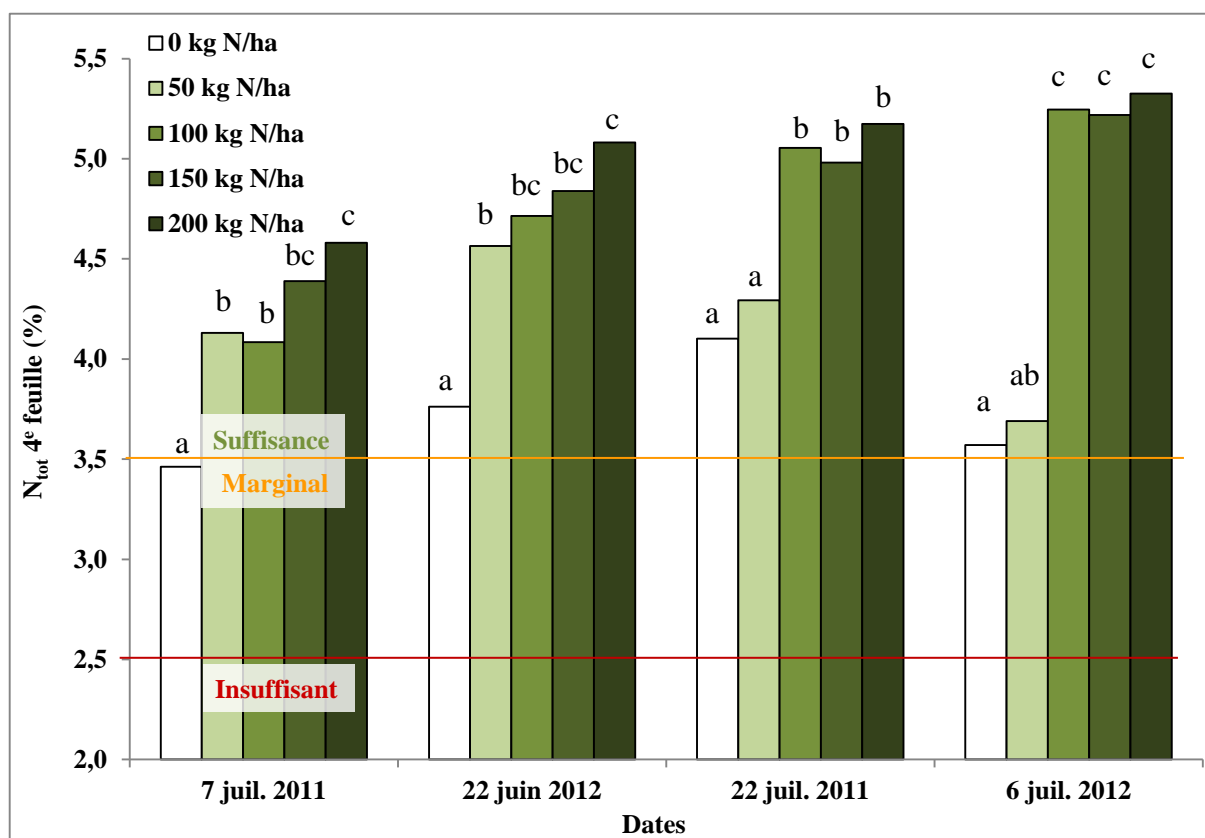


Figure 7. Teneur en N_{tot} dans la 4^e feuille mature des plants de pommes de terre en 2011 et 2012 au stade bouton et pleine floraison. Les colonnes pour une même date ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$.

3.2.2 Développement des plants

L'apport d'azote a aussi grandement influencé le développement des plants, les deux années (Interaction Dose x Date $P < 0,0001$). Le suivi de ce développement par la masse sèche permet de constater que le maximum de développement des plants s'est produit vers 74 jours après plantation (JAP) en moyenne, les deux années (2011 : 78 JAP; 2012 : 70 JAP). La Figure 8 et la Figure 9 illustrent bien aussi la démarcation entre les doses de 0 et 50 kg N ha⁻¹ et les autres. Les deux années, au pic de développement, les masses des plants ayant reçu 50 kg N ha⁻¹ ne sont pas statistiquement différentes de celles des plants non fertilisés. Ainsi, c'est à partir de la dose de 100 kg N ha⁻¹ que les plants se démarquent vraiment de ceux non fertilisés en N. Par ailleurs, les trois doses les plus élevées donnent des masses de plants similaires. À l'instar du statut nutritionnel, il n'y a donc pas eu de gain à dépasser la dose de 100 kg N ha⁻¹ les deux années, à ce stade. Par la suite, les plants entament leur sénescence jusqu'au défanage.

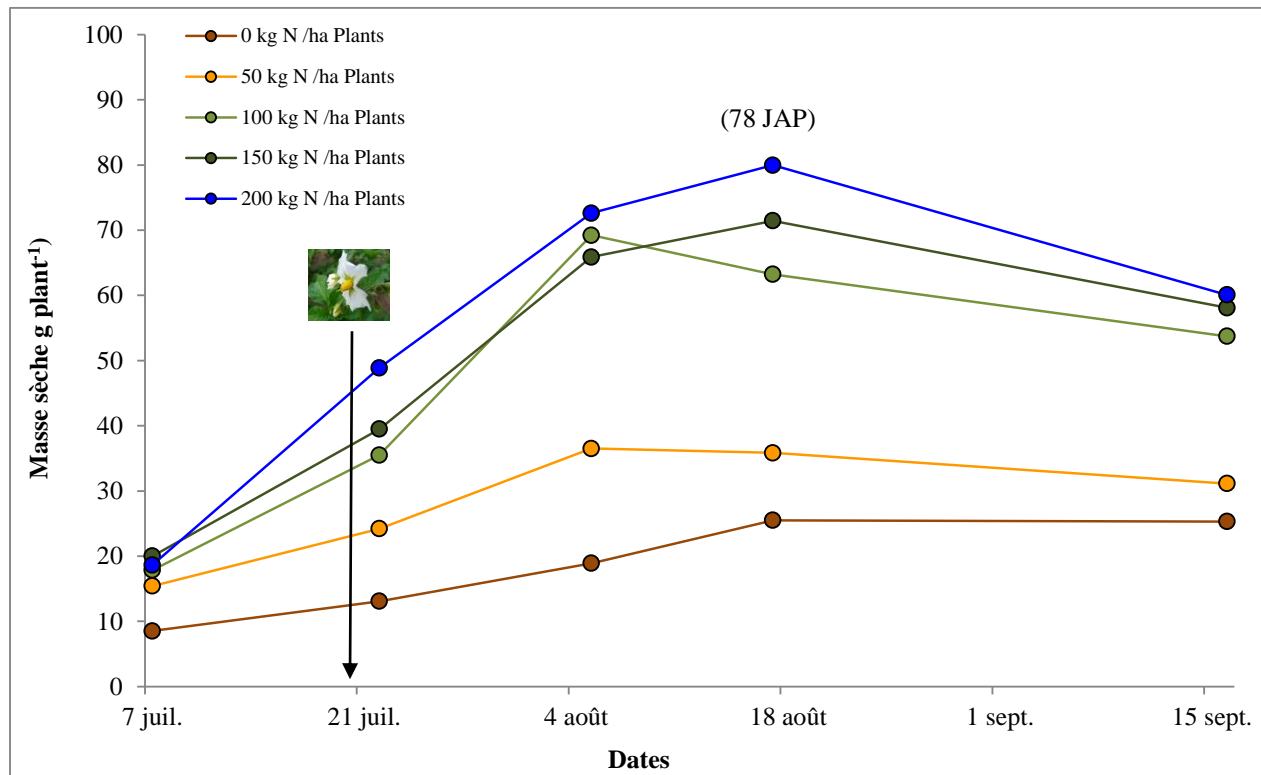


Figure 8. Évolution de la masse sèche des plants en cours de saison 2011.

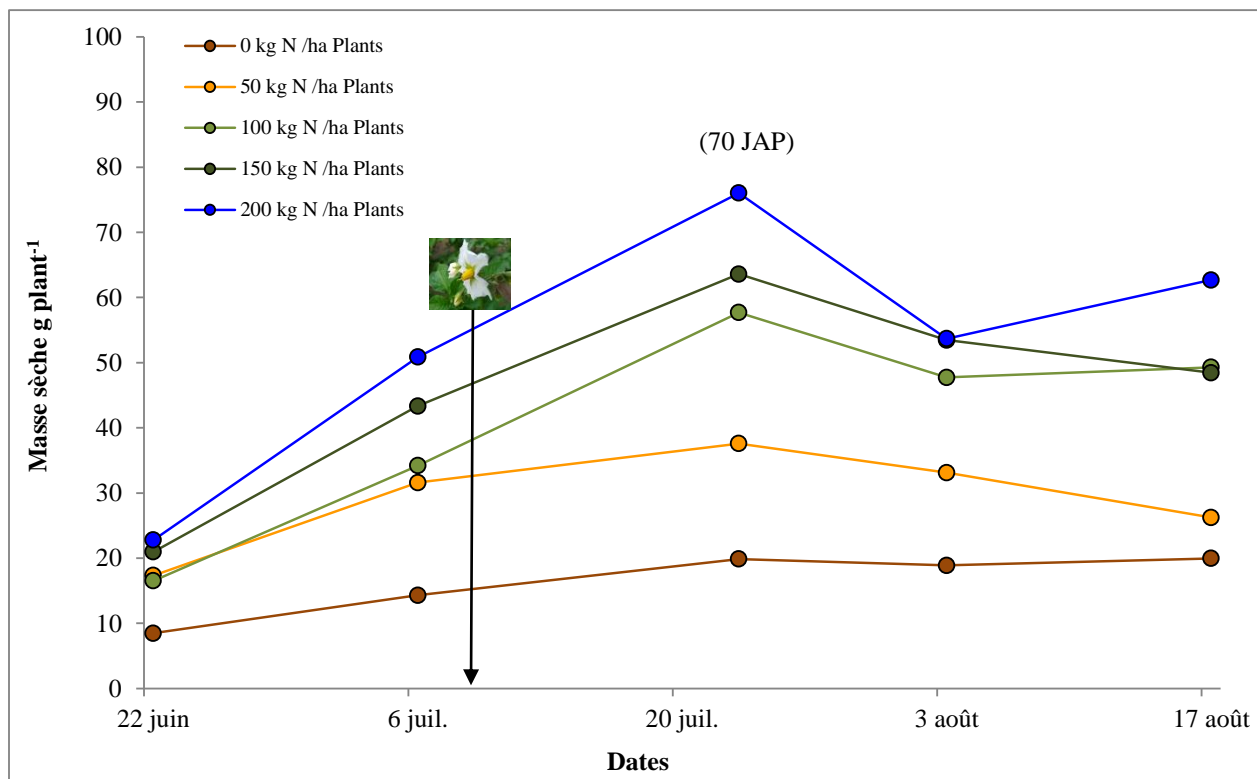


Figure 9. Évolution de la masse sèche des plants en cours de saison 2012.

3.2.3 Récoltes périodiques des tubercules

Le poids total en tubercules a été mesuré à quatre reprises durant la saison et une cinquième fois lors de la récolte finale. Les résultats sont présentés selon la saison, avec ou sans apports en eau par l'irrigation, selon la dose de N ha⁻¹ (Figure 10 à Figure 13). Cette représentation graphique du poids total en tubercules selon les paramètres énoncés précédemment permet entre autres d'apprécier l'évolution temporelle du poids et l'impact de la dose de N sur ce dernier. Le poids en tubercules mesurés dans les parcelles ayant reçu moins de 100 kg de N ha⁻¹ est nettement inférieur aux autres traitements (2011 et 2012 Ferti : $P = 0,1006$ et $P < 0,0001$; pas d'interaction Dose x Date). Il est à noter qu'il s'agit nécessairement du rendement total, car les tubercules ont été récoltés avant leur maturité. Conséquemment, le poids en tubercules au terme de la saison a été lui aussi exprimé en poids total. Toutefois, les mêmes conclusions s'appliquent pour le poids vendable en tubercules.

Globalement, le poids en tubercules des différentes combinaisons de traitements est plus faible en 2012 qu'en 2011. L'analyse statistique des résultats de 2011 indique que l'irrigation n'a pas eu d'impact sur le poids en tubercules récoltés. Toutefois, pour 2012, l'analyse indique une différence significative favorable aux parcelles irriguées, et ce, toutes doses de N et dates de récoltes confondues (Irrig: $P = 0,0150$). Une autre façon de présenter les résultats est de regrouper l'ensemble des doses en N selon qu'elles aient eu ou non des apports en eau par l'irrigation. La représentation graphique est présentée à la Figure 14 (2011) et à la Figure 15 (2012). En 2011, la démonstration de l'absence de différence est conséquente à la superposition des deux courbes. Toutefois, en 2012, la courbe représentant l'ensemble des traitements irrigués présente des rendements totaux en tubercules significativement plus élevés que ceux des traitements non irrigués.

Maintenant, pourquoi l'impact de l'irrigation est plus difficile à mesurer que celui ayant trait aux doses de N? D'un point de vue statistique, le nombre de récoltes (5 dates) permet d'augmenter la force avec laquelle le logiciel d'analyse est capable de détecter une différence significative. De plus, les traitements d'irrigation ont été disposés en parcelles principales, alors que les traitements relatifs aux doses de N étaient en sous parcelles. Cet arrangement, rendu nécessaire pour des raisons techniques de réalisation au champ, donne davantage de force à l'analyse statistique des différences relatives aux doses de N.

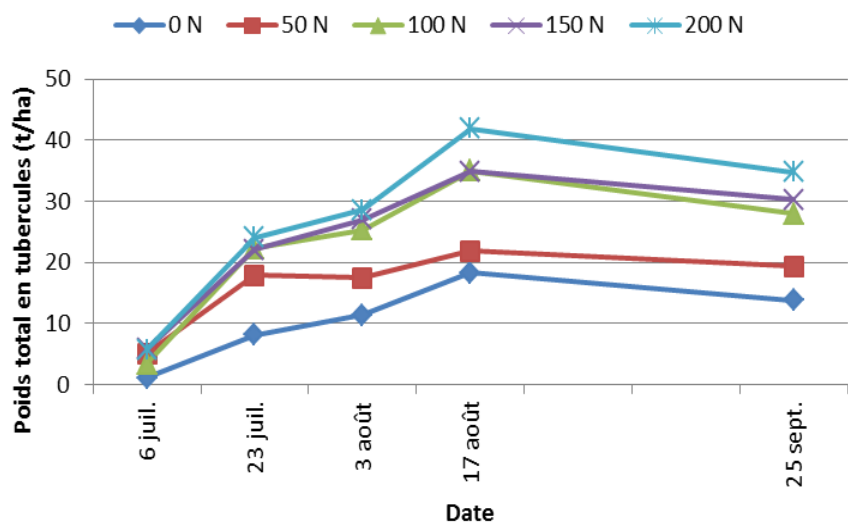


Figure 10. Poids total en tubercules ($t\ ha^{-1}$) selon la date et la dose de N ($kg\ ha^{-1}$) sans apport en eau par l'irrigation, saison 2011.

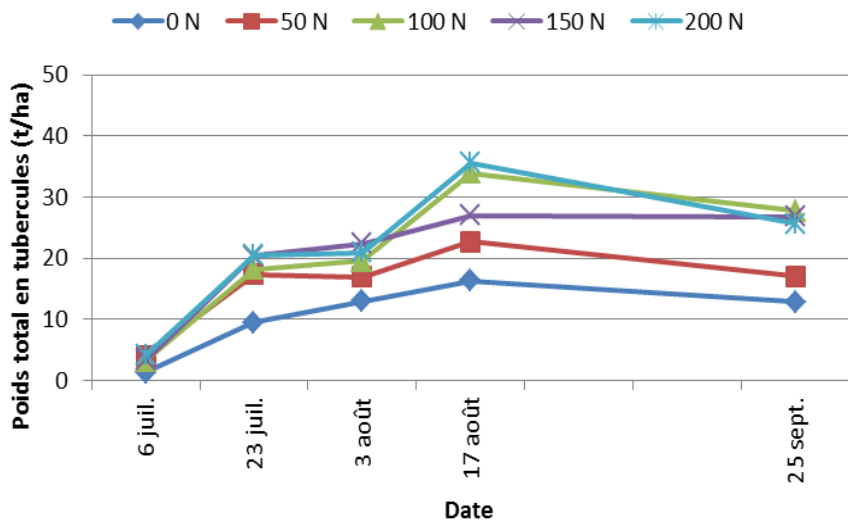


Figure 11. Poids total en tubercules ($t\ ha^{-1}$) selon la date et la dose de N ($kg\ ha^{-1}$) avec apport en eau par l'irrigation, saison 2011.

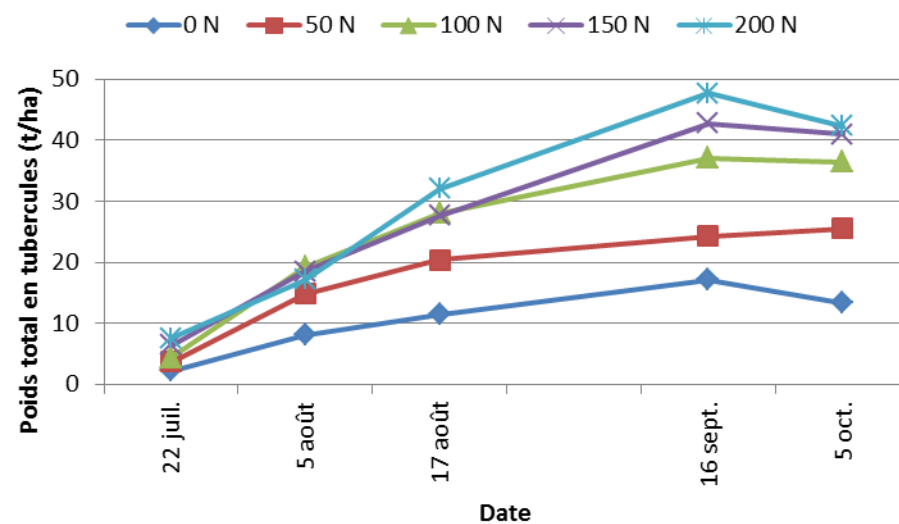


Figure 12. Poids total en tubercules ($t\ ha^{-1}$) selon la date et la dose de N ($kg\ ha^{-1}$) sans apport en eau par l'irrigation, saison 2012.

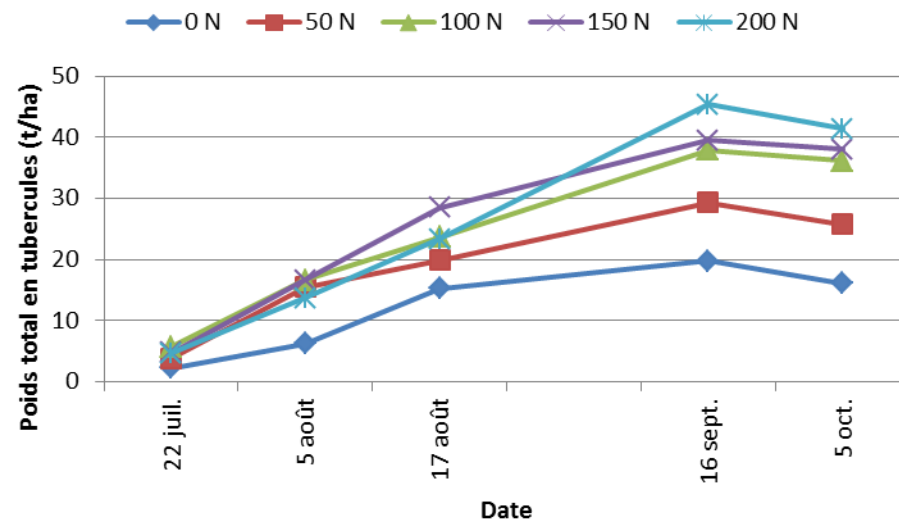


Figure 13. Poids total en tubercules ($t\ ha^{-1}$) selon la date et la dose de N ($kg\ ha^{-1}$) avec apport en eau par l'irrigation, saison 2012.

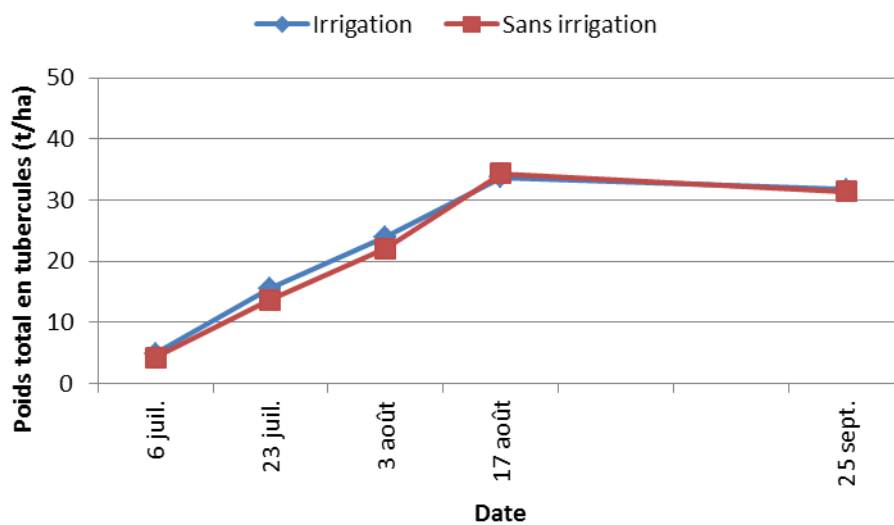


Figure 14. Poids total en tubercules ($t\ ha^{-1}$) selon la date, avec et sans apports en eau par l'irrigation, saison 2011.

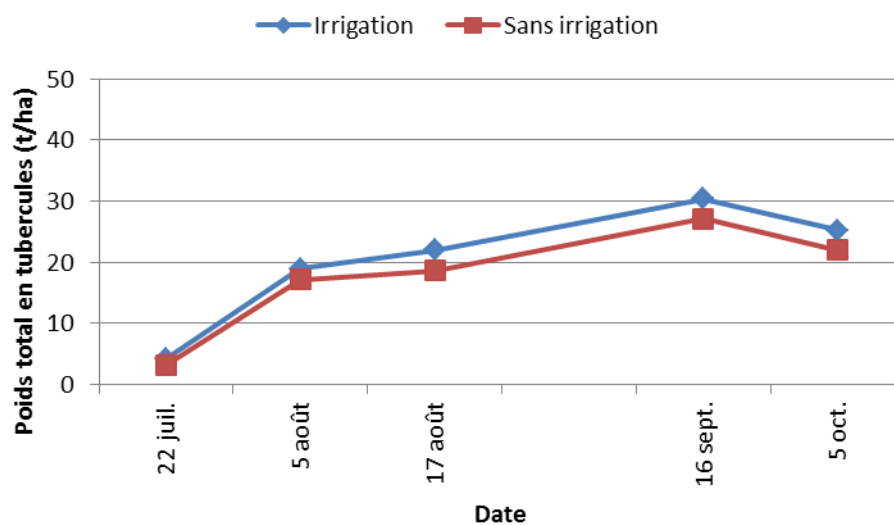


Figure 15. Poids total en tubercules ($t\ ha^{-1}$) selon la date, avec et sans apports en eau par l'irrigation, saison 2012.

3.2.4 Prélèvement en N des fanes et des tubercules

L'impact de la fertilisation azotée sur le développement des fanes et la production en tubercules s'est reflété directement sur les prélèvements en N, les deux années (fanés et tubercules : Ferti à $P < 0,0001$; interaction Dose x Date à $P < 0,0001$) (Figure 16 et Figure 17). Tout d'abord, les deux années, les prélèvements en N des fanes égalaient ceux dans les tubercules vers les 70 JAP (2011 : 78 JAP; 2012 : 70 JAP). Avant, les prélèvements en N par les fanes dominaient. En 2011, ils atteignaient entre 42 % et 71 % du taux d'application de N et en 2012, entre 37 % et 61 %. Une grande part du prélèvement en N peut donc être déjà réalisée autour de cette période. Par la suite, les prélèvements dans les tubercules se font supérieurs et atteignent un maximum à 108 et 95 JAP pour les années 2011 et 2012, respectivement. Par la suite, ils demeurent très similaires jusqu'à la récolte. En 2011, à sa valeur maximale, le N contenu dans les tubercules représente, en ordre croissant pour les doses de fertilisation N de 50 à 200 kg N ha⁻¹ : 111, 98, 78 et 66 % du taux d'application de N. En 2012, ces proportions sont, dans le même ordre, de 89, 81, 52 et 51 %. Ainsi, en moyenne, si l'on considère l'ensemble de la saison, 40% du N prélevé par la culture aura été mesuré dans les fanes et 60% dans les tubercules pour les traitements ayant reçu 100 kg N ha⁻¹ et plus.

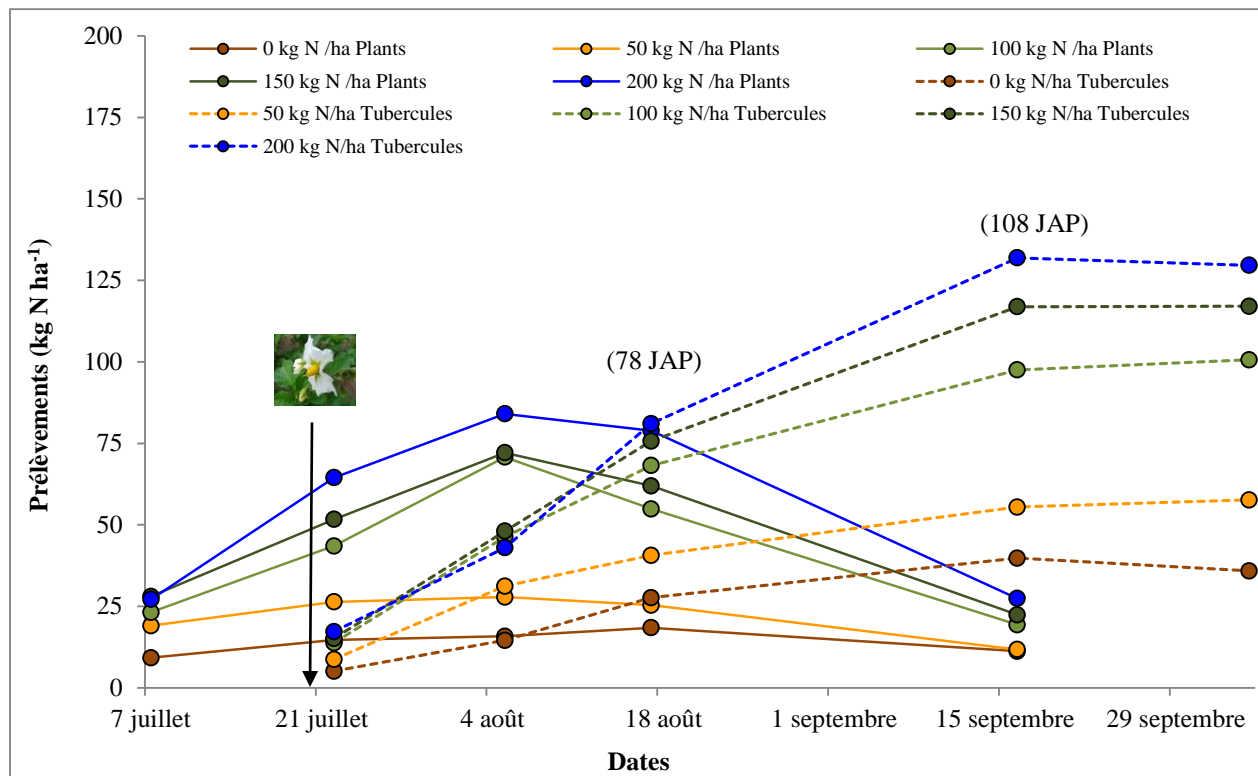


Figure 16. Prélèvements en N des fanes et tubercules en cours de saison 2011.

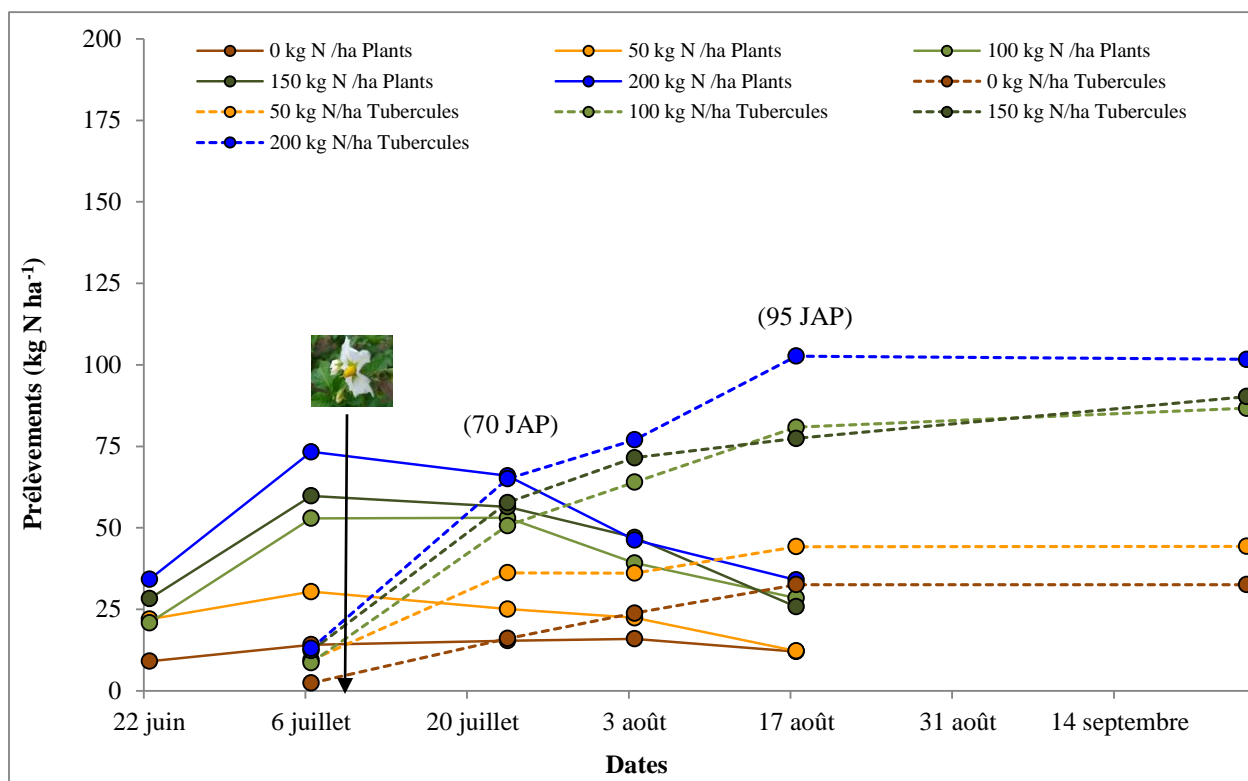


Figure 17. Prélèvements en N des fanes et tubercules en cours de saison 2012.

3.2.5 Prélèvement global en N par la culture

Si les prélèvements en N des fanes et des tubercules sont additionnés pour calculer le prélèvement global en N (Figure 18 et Figure 19) (2011 et 2012 : Ferti à $P < 0,0001$; interaction Dose x Date à $P < 0,0001$), il ressort tout d'abord qu'en moyenne sur les deux années 55 % du prélèvement final en N est déjà atteint à la floraison. La période précédant la floraison semble donc déterminante dans l'utilisation du N des engrais qui sera faite par la culture. De plus, à partir des 70 JAP, soit le 17 août en 2011 et le 23 juillet en 2012, les prélèvements globaux en N plafonnent, et ce, jusqu'à la récolte. La culture utilise donc en moyenne 74 jours pour prélever l'azote. Pour le taux d'application de 200 kg N ha^{-1} , ceci signifie que la culture a prélevé en moyenne sur les deux années un équivalent de 2 kg N ha^{-1} par jour, de la plantation à 74 JAP. Une fois plafonnés, les prélèvements globaux représentent pour les doses de fertilisation de 50 à 200 kg N ha^{-1} : 132, 123, 92 et 80 % du taux d'application de N en 2011. En 2012, ces pourcentages sont de : 123, 104, 76 et 66 % du taux d'application de N. Ainsi, la proportion de N prélevé par kilo de N apporté n'est pas la même selon le taux de fertilisation azotée. En fait, cette proportion décroît au fur et à mesure que la fertilisation N augmente. De plus, pour un même taux de fertilisation azotée, les niveaux de prélèvements en N par la culture sont différents d'une année à l'autre, avec de moins bon taux l'année où les rendements ont été moins élevés. Par ailleurs, en absence de fertilisation azotée, le sol a fourni à lui seul 51 et 45 kg N ha^{-1} en 2011 et 2012, respectivement. Ceci représente en moyenne le tiers de la dose de N recommandée (CRAAQ 2010) de 150 kg N ha^{-1} . Ce constat fait ressortir l'importance de maintenir le sol en santé, car sa contribution en N peut donc être très significative. Dans le cas des doses de 50 à 200 kg N ha^{-1} , les prélèvements globaux maximaux ont été dans l'ordre de 70, 123, 139 et 160 kg N ha^{-1} en 2011 et de 61, 115, 119 et 137 kg N ha^{-1} en 2012.

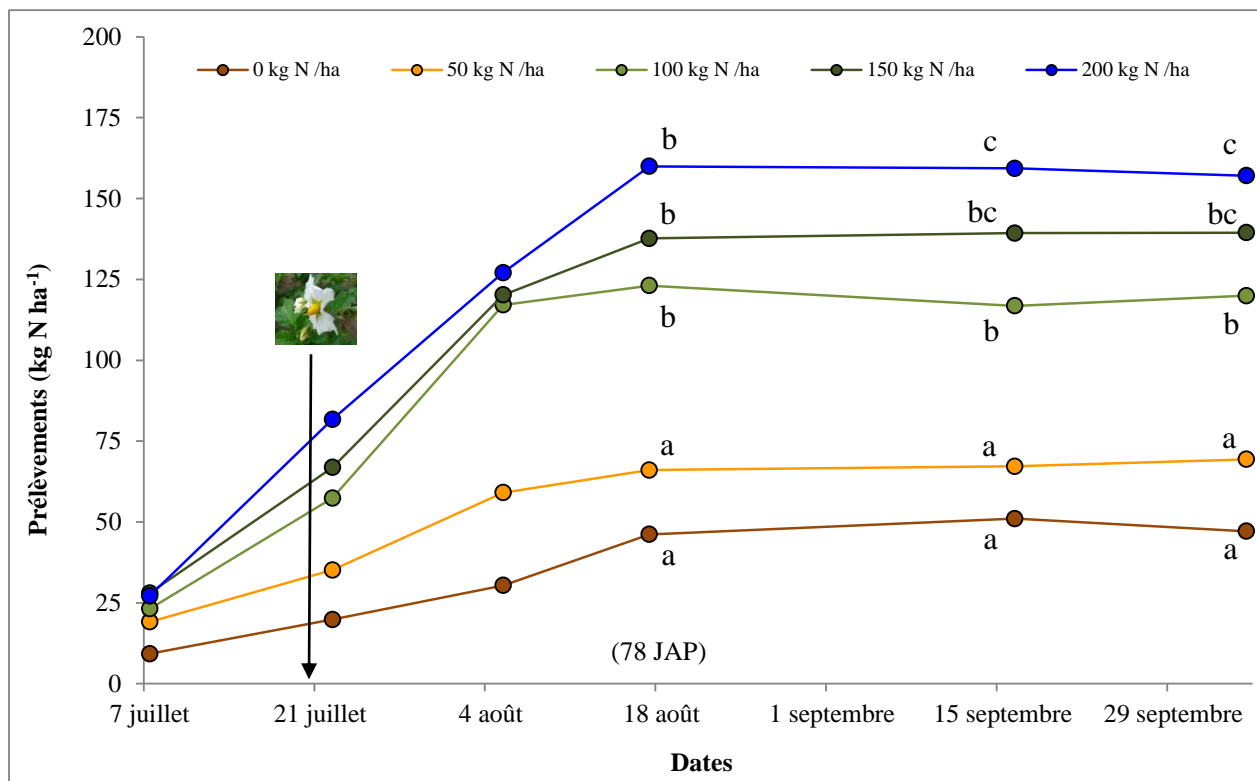


Figure 18. Prélèvements globaux en N par la culture en cours de saison 2011.

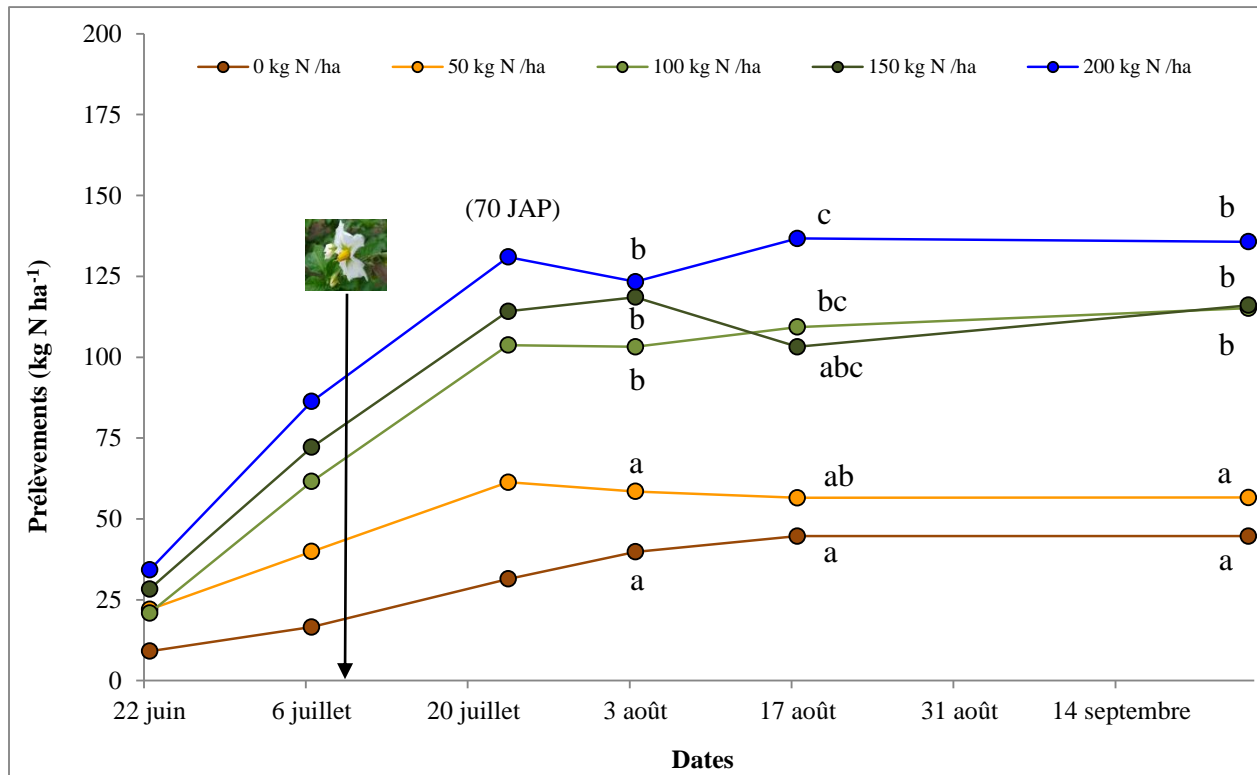


Figure 19. Prélèvements globaux en N par la culture en cours de saison 2012.

3.2.6 Disponibilité du N du sol

Les deux années, tant la fertilisation N (2011 et 2012 : $P < 0,001$) que l'irrigation (2011 : $P = 0,0369$; 2012 : $P = 0,0017$) ont influencé la quantité de N disponible sous forme de nitrate dans la couche utile de sol (Figure 20 et Figure 21). En 2011, toutes irrigations confondues (interaction Dose x Date à $P < 0,001$), la fertilisation azotée a influencé la teneur en N-NO₃ dans la période précédant le 5 août (66 JAP). Le sol des parcelles non fertilisées en N ou ayant reçu 50 kg N ha⁻¹ présentaient alors entre 2 et 8 fois moins de N-NO₃ que celui des traitements de 150 et 200 kg N ha⁻¹. Par contre, à tout moment, les teneurs mesurées dans les sols des parcelles ayant reçu de 100 à 200 kg N ha⁻¹ étaient similaires. Pour ce qui est de l'irrigation, toutes doses de N confondues (interaction Irrig x Date à $P = 0,0204$), le sol des parcelles irriguées contenait de 1,16 à 1,46 fois moins de N-NO₃ que les non irrigués lors des mesures du 22 juillet (52 JAP) et du 5 août (66 JAP). En 2012, (interaction Date x Dose x Irrig à $P < 0,001$) l'impact de l'irrigation sur les teneurs en nitrate a été encore plus grand, ce qui concorde avec le fait que beaucoup plus d'épisodes d'irrigation ont eu lieu. Ainsi, à partir du 6 juillet (53 JAP), non seulement le sol des parcelles 0 et 50 kg N ha⁻¹ contenait moins de N-NO₃ que celui des parcelles ayant reçu entre 100 et 200 kg N ha⁻¹, mais la différence était beaucoup plus grande en absence d'irrigation. Autrement dit, en présence d'irrigation, une partie du N supplémentaire apporté par les doses plus grandes de fertilisation a été perdue, diminuant les différences entre les parcelles peu et plus fertilisées.

En regard de la quantité de N-NO₃ comme telle dans le sol des parcelles fertilisées en N, en 2011, on constate que des teneurs en N-NO₃ sur base sèche allant de 50 à 105 kg N-NO₃ ha⁻¹ étaient présentes juste avant le fractionnement (37 JAP) et de 11 à 151 kg N-NO₃ ha⁻¹ au pic de disponibilité (52 JAP). En 2012, avant fractionnements, les teneurs en N-NO₃ étaient entre 16 et 29 kg N-NO₃ ha⁻¹ et entre 11 et 117 kg N-NO₃ ha⁻¹ au pic de disponibilité. En général, pour les deux années d'essai, 1) le sol des parcelles ayant reçu 50 kg N ha⁻¹ s'est épuisé très rapidement en N-NO₃ dès la date du fractionnement, 2) pour les doses de 100 à 200 kg N ha⁻¹, le sol contenait entre 50 et 79 % de ce qui avait été apporté au pic de disponibilité et 3) l'écart entre la dose apportée et celle mesurée était toujours la plus grande pour le taux de 200 kg N ha⁻¹. Enfin, les teneurs en N-NO₃ atteignent les deux années leurs plus basses valeurs à la date où les prélèvements globaux en N plafonnent. Ceci porte à se demander si les prélèvements en N par la culture n'auraient pas été plus élevés si la disponibilité en N-NO₃ s'était maintenue plus longtemps.

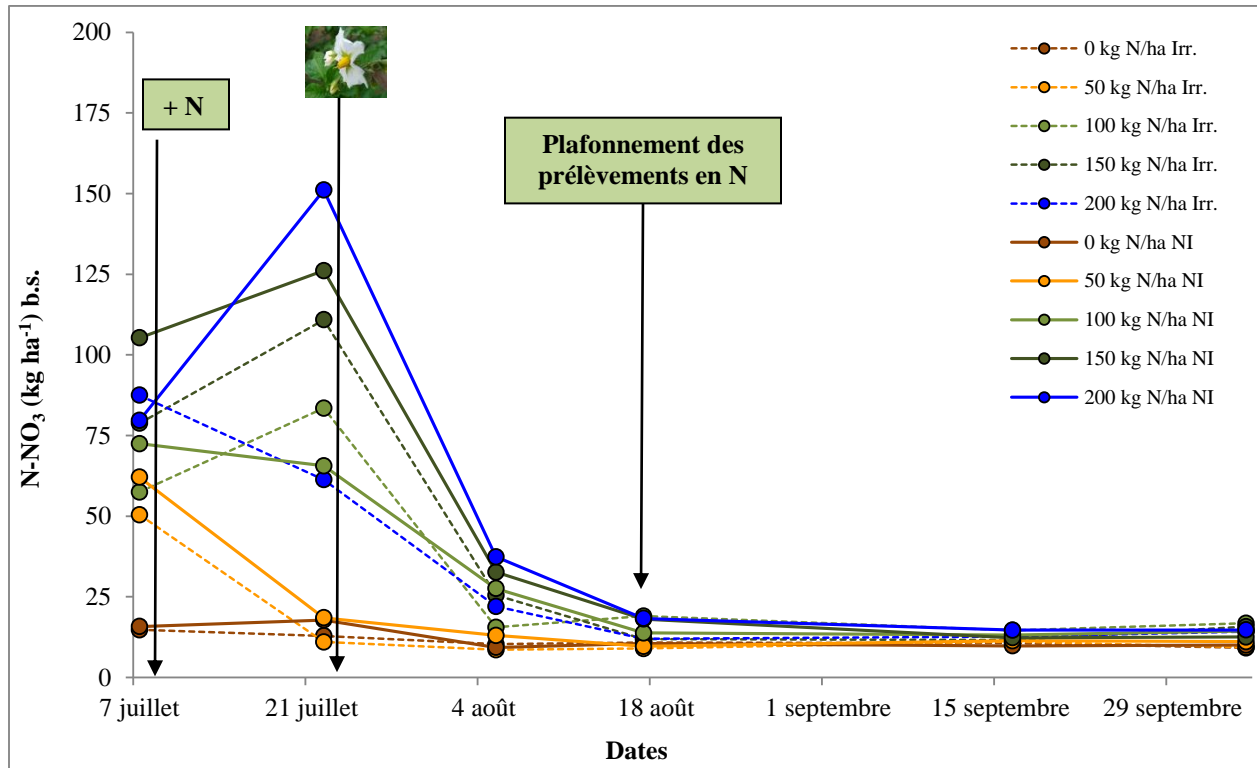


Figure 20. Contenu en N sous forme de nitrate dans la couche 0-30 cm de sol en cours de saison 2011.

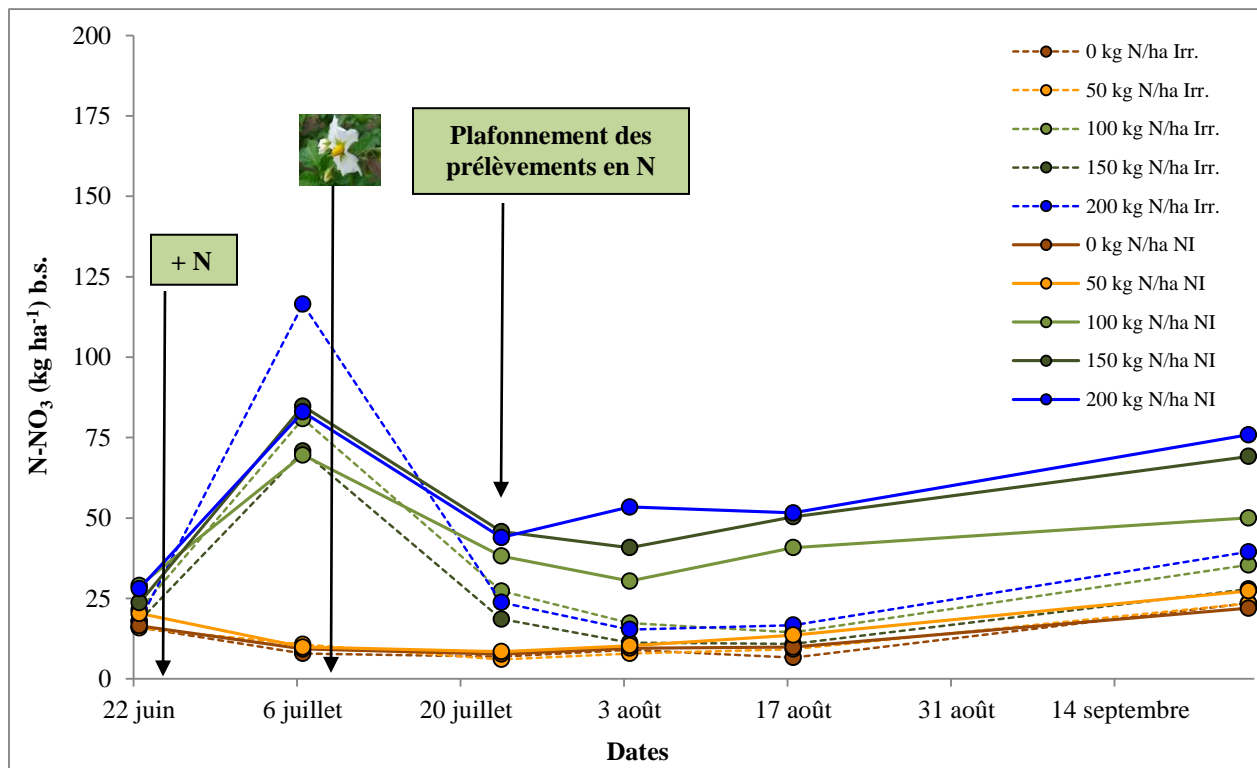


Figure 21. Contenu en N sous forme de nitrate dans la couche 0-30 cm de sol en cours de saison 2012.

3.2.7 Teneur du sol en N résiduel à la récolte

À la récolte, les teneurs en nitrate résiduel sont fort différentes entre 2011 et 2012 (Figure 22 et Figure 23). En effet, les quantités de nitrate résiduel sont beaucoup plus élevées l'année où les rendements produits sont moindres. Ainsi, en 2012, les rendements ont été de 1,4 à 1,7 fois moins élevés et le nitrate résiduel est 2 à 6 fois plus grand. Ceci concorde avec le fait qu'une production moindre en tubercules occasionne aussi un prélèvement moindre de N, laissant une plus grande part inutilisée des engrais N. Par ailleurs, en 2011, ni la fertilisation N ni l'irrigation n'ont influencé la teneur en nitrate résiduel qui est de 13 kg N-NO₃ ha⁻¹ en moyenne, ce qui est peu en comparaison d'une majorité de doses apportées. Par contre, en 2012, tant la fertilisation azotée que l'irrigation ont un impact significatif sur les quantités de N-NO₃ résiduel. Dans les parcelles irriguées, les valeurs résiduelles sont similaires statistiquement et beaucoup moins importantes que dans les parcelles non-irriguées, ce qui suggère qu'il y a eu davantage de lessivage du nitrate dans les parcelles irriguées. Ainsi, en moyenne, le sol des parcelles fertilisées et irriguées contenait 8 kg ha⁻¹ de N-NO₃ résiduel. Par contre, en absence d'irrigation, les valeurs atteignaient des quantités beaucoup plus importantes. Ceci ne signifie pas qu'en absence d'irrigation, il y ait moins de problématique de lessivage du nitrate. Elle est simplement présente sous une autre forme. En effet, au moment de la récolte, moins de nitrate a effectivement été lessivé à cette date. Par contre, le nitrate n'a pas été davantage prélevé et sera probablement seulement lessivé plus tard, avec les pluies d'automne ou suivant la fonte des neiges au printemps. Et ces quantités sont importantes puisque pour les doses de 50 à 200 kg N ha⁻¹, les quantités de N-NO₃ résiduel excédaient, dans l'ordre, de 5, 28, 47 et 54 kg N-NO₃ ha⁻¹ la valeur du sol témoin non fertilisé en N. Pour les taux de fertilisation de 100 à 200 kg N ha⁻¹, la quantité totale de N-NO₃ mesurée représentait donc 50, 46 et 38 % du taux d'application. Des solutions pour améliorer le prélèvement du N en saison et capter les quantités résiduelles en post-récolte avant son lessivage sont donc à développer.

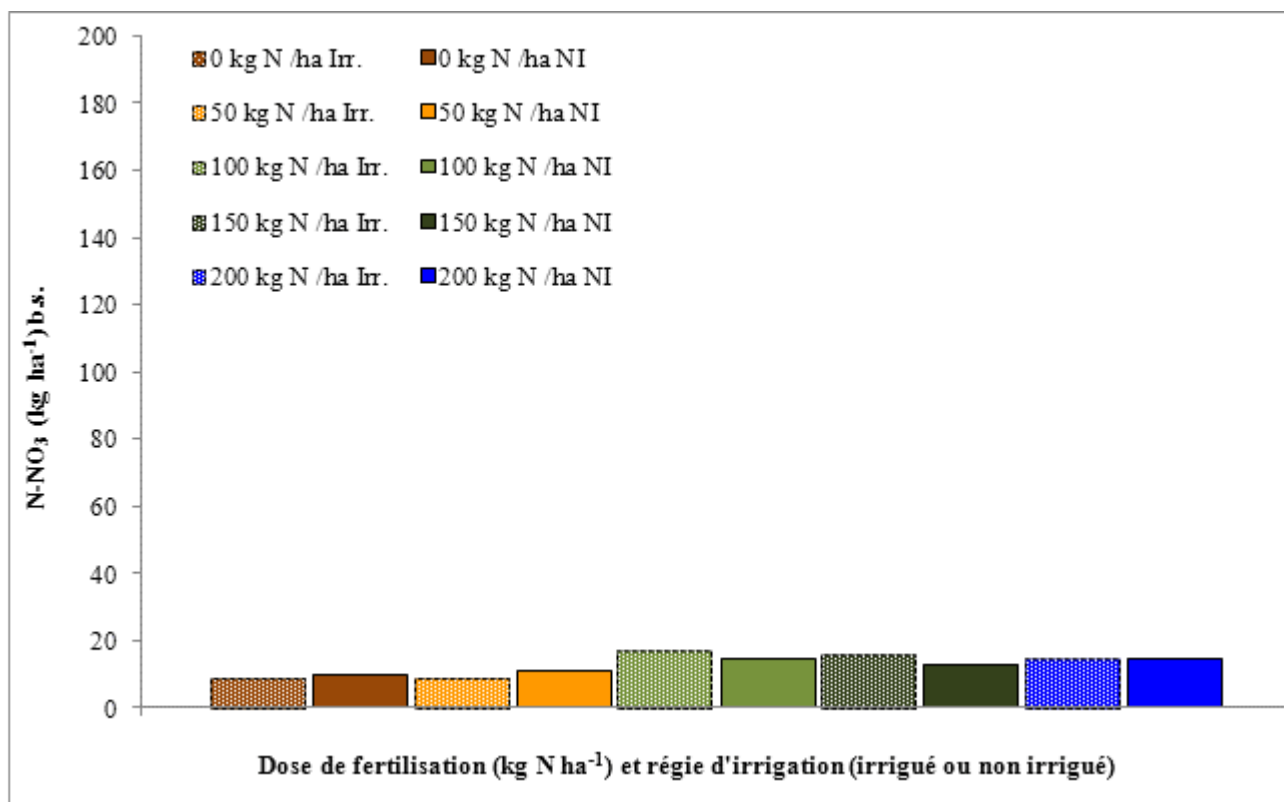


Figure 22. Contenu en nitrate résiduel dans la couche 0-30 cm de sol selon le taux de fertilisation N et la régie d'irrigation à la récolte en 2011.

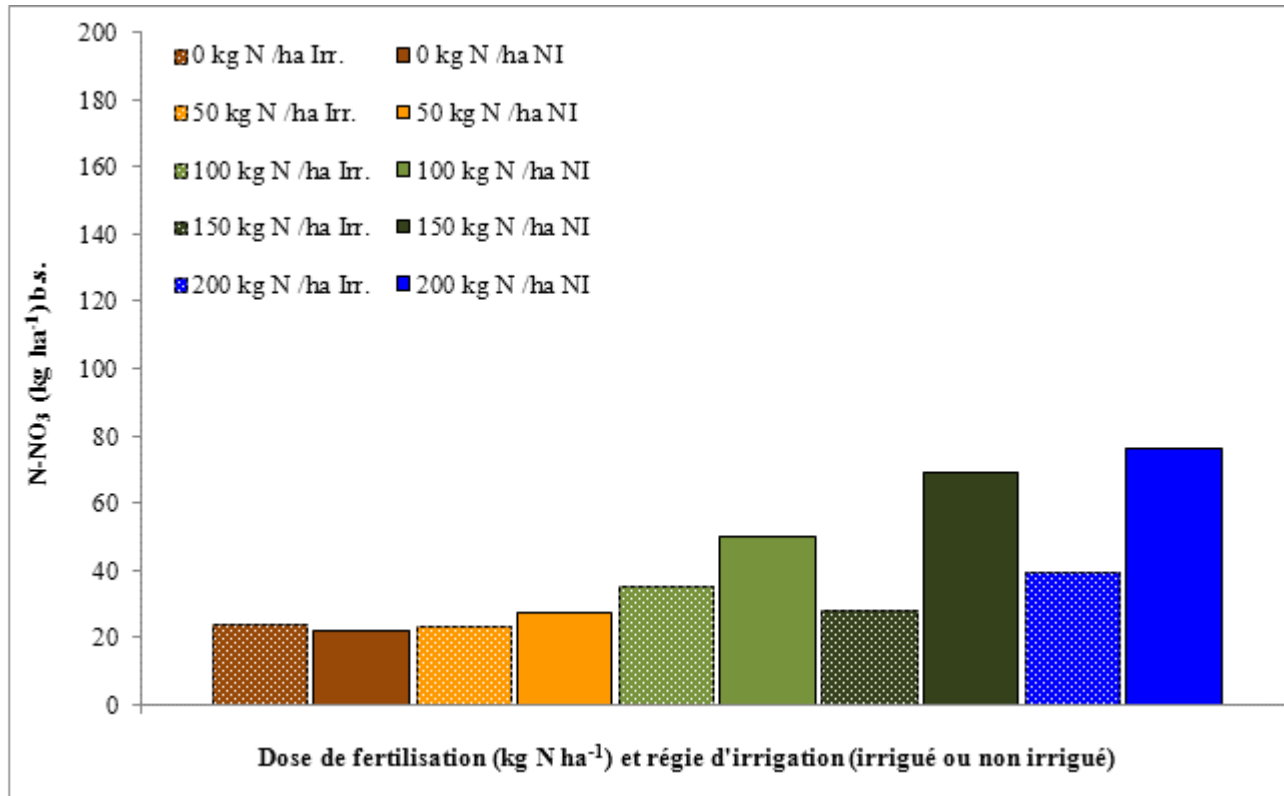


Figure 23. Contenu en nitrate résiduel dans la couche 0-30 cm de sol selon le taux de fertilisation N et la régie d'irrigation à la récolte en 2011.

3.3 Connaître l'évolution du taux d'utilisation du N de l'engrais durant la saison selon la dose de N apportée, avec et sans irrigation.

Le calcul des CUA sur la saison permet de constater que dès la floraison, 31 à 47 % du N des engrais sont déjà utilisés (Tableau 4). Par la suite, ce taux augmente plus ou moins fortement jusqu'à la récolte selon le taux de fertilisation azotée. Ainsi, au final, le taux d'utilisation du N des engrais se situent entre 24 % et 73 %, selon la dose de N apportée et les années. La variation des rendements produits explique en majeure partie les différences entre les années, avec une utilisation moindre en présence de moins de production de tubercules. Pour ce qui est de l'influence des taux de fertilisation azotée, on constate que le CUA dans les parcelles ayant reçu 50 kg N ha⁻¹ est le plus bas, même si ces parcelles ont reçu la plus faible dose de N (excepté la dose zéro des parcelles témoins), probablement parce que le sous-développement des plants s'est accompagné d'une réduction du système racinaire et donc de l'accès au N dans le sol.

Pour les taux de fertilisation entre 100 et 200 kg N ha⁻¹, il ressort que l'utilisation du N diminue au fur et à mesure que la dose augmente. Le meilleur taux d'utilisation du N des engrais a donc été mesuré dans les parcelles ayant reçu 100 kg N ha⁻¹, avec des CUA finaux de 73 % et 71 % en 2011 et 2012, respectivement. Environ 30 % de la dose de N apportée est donc resté non prélevé, ce qui représente un très bon taux d'utilisation puisque l'atteinte d'un CUA de 100 % est impossible. 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). À la dose recommandée de 150 kg N ha⁻¹, les CUA du N sont de 62 % et 48 % en 2011 et 2012, respectivement. Au taux de fertilisation de 200 kg N ha⁻¹, les CUA s'abaissent encore pour s'établir à 55 % et 46 % en 2011 et 2012, respectivement. La partie non utilisée des engrais N demeurant non prélevés lorsque l'on applique plus que la dose recommandée est donc très importante. Par exemple, en 2012 dans les parcelles non irriguées, il y avait une teneur de 76 kg N ha⁻¹ dans les parcelles recevant 200 kg N ha⁻¹, comparativement à 50 kg N ha⁻¹ dans les parcelles fertilisées avec 100 kg N ha⁻¹.

Ainsi, lorsque le taux recommandé de fertilisation N de 150 kg N ha⁻¹ a été employé (CRAAQ 2010), 57 et 79 kg N ha⁻¹ sont restés non prélevés dans le milieu en 2011 et 2012, respectivement. Selon leur valeur annuelle moyenne de 68 kg N ha⁻¹, sur la base des 17 000 ha en production de pommes de terre au Québec en 2012 (ISQ 2013), c'est ainsi théoriquement 1,2 million de kg N par an qui demeurent non prélevés dans le milieu. Ces quantités sont non négligeables et démontrent l'importance de fertiliser selon la dose économique optimale afin de limiter au mieux les pertes puisqu'une fois le taux optimal dépassé, les CUA s'abaissent rapidement. Par exemple, dans cette étude, les pertes au taux de fertilisation de 200 kg N ha⁻¹ seraient théoriquement de 1,7 million de kg N par an pour la même superficie, soit 500 000 kg N ha⁻¹ de plus.

Tableau 4. Coefficient d'utilisation apparente (CUA) du N des engrais selon la fertilisation azotée pour les saisons 2011 et 2012.

Années	Fertilisation (kg N ha ⁻¹)	CUA (%) [†]					
		Pré-frac. [‡]	Floraison	Début août	Mi-août	Défanage	Récolte
2011	JAP	37	52	66	78	108	140
	Dates	8 juil.	23 juil.	6 août	18 août	17 sept.	19 oct.
	0	-	-	-	-	-	-
	50	20	31	57	40	32	45
	100	28	38	87	77	66	73
	150	25	31	60	63	59	62
	200	18	31	48	57	54	55
2012	JAP	39	53	70	81	107	134
	Dates	22 juin	6 juil.	23 juil.	3 août	17 août	25 sept.
	0	-	-	-	-	-	-
	50	26	47	60	37	24	24
	100	24	45	72	63	65	71
	150	26	37	55	53	39	48
	200	25	35	50	42	46	46

[†] Les CUA tiennent compte de la somme des prélèvements en N des plants et des tubercules lorsque les deux étaient présents à la période indiquée. Une valeur de 20% signifie, par exemple, que 20% du N des engrais se retrouvent prélevés par la culture, et donc utilisés.

[‡] Le calcul du CUA au stade pré-fractionnement ne tient compte que de la partie de l'engrais appliquée à la plantation.

3.4 Détailler l'évolution tout au long de la saison de l'atteinte des différents stades phénologiques du cultivar Goldrush selon la fertilisation et l'absence ou la présence d'irrigation.

La fertilisation azotée a modifié la date d'atteinte des divers stades phénologiques (Tableau 5). En 2011, pour le stade 0 et 1, seuls les plants non fertilisés en N montraient un retard par rapport aux autres traitements de fertilisation. Par contre, à partir du stade 2, les plants étaient toujours plus avancés d'autant qu'ils étaient fertilisés en N. En 2012, la situation a été similaire, excepté qu'il y avait moins de différence entre les plants ayant reçu de 100 à 200 kg N ha⁻¹ (Tableau 6).

Tableau 5. Impact du taux de fertilisation azotée sur l'atteinte des stades phénologiques de la culture de pommes de terre en 2011.

Stades	Dates	Taux de fertilisation (kg N ha ⁻¹)				
		0	50	100	150	200
Émergence (0)	23 juin	46	54	56	59	51
	4 juillet	93	38	38	31	29
	8 juillet	0	0	0	0	0
	14 juillet	0	0	0	0	0
Différenciation (1)	23 juin	0	0	0	0	0
	4 juillet	7	61	61	68	69
	8 juillet	97	53	41	31	19
	14 juillet	22	3	1	1	0
Boutons floraux (2)	23 juin	0	0	0	0	0
	4 juillet	0	1	1	1	1
	8 juillet	3	48	59	69	81
	14 juillet	73	41	23	26	1
Boutons floraux pédonculés (3)	23 juin	0	0	0	0	0
	4 juillet	0	0	0	0	0
	8 juillet	0	0	0	0	0
	14 juillet	4	53	74	69	91
Début floraison (4)	23 juin	0	0	0	0	0
	4 juillet	0	0	0	0	0
	8 juillet	0	0	0	0	0
	14 juillet	1	3	3	4	8

Tableau 6. Impact du taux de fertilisation azotée sur l'atteinte des stades phénologiques de la culture de pommes de terre en 2012.

Stades	Dates	Taux de fertilisation (kg N ha ⁻¹)				
		0	50	100	150	200
Émergence (0)	6 juin	24	46	51	50	50
	14 juin	99	69	54	58	58
	20 juin	0	0	0	0	0
	4 juillet	0	0	0	0	0
	12 juillet	0	0	0	0	0
Différenciation (1)	6 juin	0	0	0	0	0
	14 juin	1	31	46	42	43
	20 juin	100	81	71	72	57
	4 juillet	0	0	0	0	0
	12 juillet	0	0	0	0	0
Boutons floraux (2)	6 juin	0	0	0	0	0
	14 juin	0	0	0	0	0
	20 juin	0	19	29	28	43
	4 juillet	0	0	0	0	0
	12 juillet	0	0	0	0	0
Boutons floraux pédonculés (3)	6 juin	0	0	0	0	0
	14 juin	0	0	0	0	0
	20 juin	0	0	0	0	0
	4 juillet	98	89	91	91	86
	12 juillet	0	0	0	0	0
Début floraison (4)	6 juin	0	0	0	0	0
	14 juin	0	0	0	0	0
	20 juin	0	0	0	0	0
	4 juillet	2	11	9	9	14
	12 juillet	0	0	0	0	0
Pleine floraison (5)	6 juin	0	0	0	0	0
	14 juin	0	0	0	0	0
	20 juin	0	0	0	0	0
	4 juillet	0	0	0	0	0
	12 juillet	100	100	75	88	75
Fin floraison (6)	6 juin	0	0	0	0	0
	14 juin	0	0	0	0	0
	20 juin	0	0	0	0	0
	4 juillet	0	0	0	0	0
	12 juillet	0	0	25	13	25

3.5 Déterminer si l'irrigation modifie la dose de N qui permet un rendement optimal.

En 2011, les rendements vendables ont été les plus élevés avec la dose de 150 kg N ha⁻¹. Par contre, en 2012, il n'y a eu aucun gain significatif à dépasser la dose de 100 kg N ha⁻¹. L'année 2012 a toutefois produit des rendements beaucoup moins élevés, suggérant que des conditions autres que la fertilisation étaient limitantes pour le rendement. Par ailleurs, la dose économique optimale a été similaire les deux années et a été établie en moyenne à 185 kg N ha⁻¹ (Figure 24). Par contre, tel que mentionné dans les sections précédentes, d'une part, le meilleur CUA du N des engrais a été atteint avec la dose de 100 kg N ha⁻¹ à chacune des années. D'autre part, du moins pour 2012, la quantité de nitrate résiduel la plus élevée a été mesurée pour la dose de fertilisation N de 200 kg N ha⁻¹. La dose optimale économique offre donc un certain compromis entre les deux.

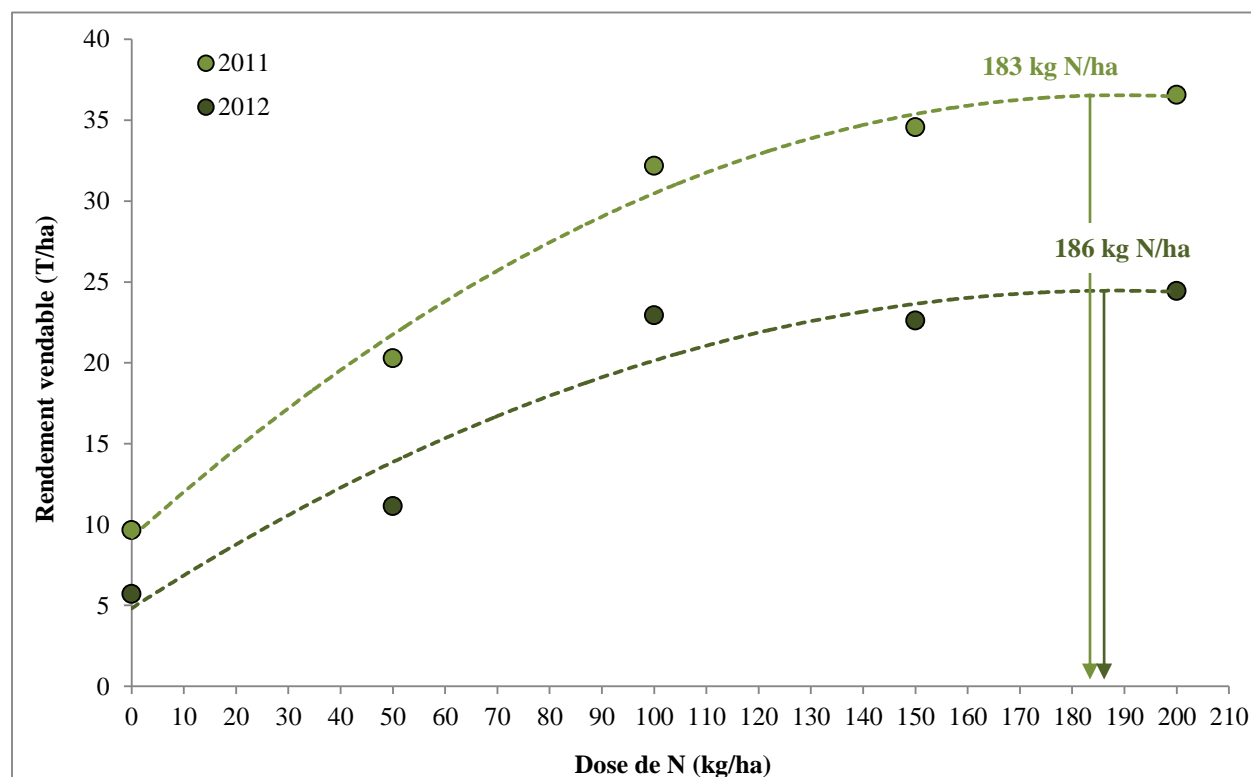


Figure 24. Impact du taux de fertilisation azoté sur les rendements vendables en 2011 et 2012.

3.6 Déterminer à quel point la fertilisation croissante en N modifie la demande en eau pour une consigne de déclenchement de l'irrigation donnée (50 % de la réserve utile).

Le nombre d'épisodes d'irrigation effectués en 2011 et 2012 est présenté au Tableau 7 selon la dose en N apportée et la période. Tout d'abord, le nombre d'irrigations nécessaire pour maintenir le statut hydrique du sol dans les conditions ciblées a été, globalement, deux fois plus élevées en 2012. Cela va de pair avec les conditions météorologiques plus propices aux déficits hydriques enregistrés durant cette saison (Figure 3 à Figure 6). En 2011, l'ensemble des épisodes d'irrigation a eu lieu avant le 23 juillet (53 JAP), soit la période où moins de 25 % du poids total en tubercules était atteint (Figure 10 et Figure 11). La balance du développement des tubercules a donc été réalisée dans des conditions où les apports en eau par les précipitations étaient suffisants. En 2012, les apports ont été réalisés entre le 23 juin et le 3 août (40-81 JAP) où près de 75 % du poids total en tubercules a été atteint (Figure 12 et Figure 13).

Maintenant, les deux années, c'est dans les parcelles n'ayant reçu aucune fertilisation azotée que le nombre d'épisodes d'irrigation a été le plus bas, soit respectivement 2 et 6 épisodes en 2011 et 2012. Le nombre d'irrigations nécessaires pour les parcelles ayant reçu entre 50 et 150 kg de N ha⁻¹ est comparable. Toutefois, les parcelles ayant reçu la plus grosse dose en N ont nécessité un épisode de plus que les autres parcelles. Les parcelles n'ayant reçu aucun apport en N auraient possiblement nécessité encore moins d'épisodes si ce n'était à cause de leur faible développement végétatif qui expose une plus grande superficie de sol et plus longtemps que les autres parcelles. Les pertes en eau par transpiration sont certes plus faibles, mais les pertes conséquentes à l'évaporation sont plus élevées.

Tableau 7. Nombre d'épisodes d'irrigation effectué en 2011 et 2012 selon le traitement et la période.

Années	Traitements	Nombre d'irrigations par période ^a						Total	
		JAP	0-37	38-52	53-66	67-78	79-108		109-127
	Dates	-8 juil.	-23 juil.	-6 août	-18 août	-17 sept.	-19 oct.		
2011	0N - I _{50%}	0	2	0	0	0	0	2	
	50N - I _{50%}	0	3	0	0	0	0	3	
	100N - I _{50%}	0	3	0	0	0	0	3	
	150N - I _{50%}	0	2	0	0	0	0	2	
	200N - I _{50%}	0	4	0	0	0	0	4	
2012		JAP	0-39	40-53	54-70	71-81	82-107	108-134	
		Dates	-22 juin	-6 juil.	-23 juil.	-3 août	-17 août	-25 sept.	
	0N - I _{50%}	0	1	3	2	0	0	6	
	50N - I _{50%}	0	1	4	2	0	0	7	
	100N - I _{50%}	0	1	4	2	0	0	7	
	150N - I _{50%}	0	1	4	2	0	0	7	
200N - I _{50%}	0	1	4	3	0	0	8		

^aLes périodes sont délimitées, dans l'ordre, par les stades pré-fractionnement, 50-75 % de floraison, début août, mi-août, défanage et récolte.

3.7 Évaluer les bénéfices économiques potentiels à tirer de la synergie entre la fertilisation N et l'irrigation. Soit déterminer la fonction de production de pommes de terre afin d'évaluer la combinaison d'intrants optimale, soit la combinaison d'irrigation et de fertilisation azotée qui maximise le profit du producteur.

L'analyse économique a consisté à déterminer les taux d'application optimaux des engrais azotés en tenant compte de l'irrigation. Ces taux optimaux sont obtenus en maximisant la fonction de profit qui, elle-même, est obtenue par la fonction de production. Cette dernière définit le processus de transformation des intrants (irrigation et fertilisation azotée) en extrant (production de pommes de terre). En termes génériques, la fonction de production s'illustre comme suit (Debertin 1986).

$$y = f(X) \quad (1)$$

Où : y est le rendement vendable en pomme de terre;
X est le vecteur des intrants, soit l'irrigation et la fertilisation azotée dans le cas présent.

En termes économétriques, la fonction de production peut s'écrire sous la forme quadratique suivante :

$$y = \alpha + \beta_1 N + \beta_2 N^2 + \beta_3 I + \epsilon \quad (2)$$

Où : y est le rendement vendable de pomme de terre;
N est le taux de fertilisation azotée (N = 0, 50, 100, 150, 200);
I est une variable dichotomique indiquant si l'irrigation a été utilisée ou non (I = 0,1);
 α, β_k sont les coefficients à estimer;
 ϵ est un terme d'erreur.

Plusieurs autres spécifications de la fonction de production ont été vérifiées. Par exemple, une variable tenant compte d'une interaction possible entre l'irrigation et le taux d'application d'engrais azoté au fractionnement a été créée et introduite dans le modèle. Cependant, toutes les autres spécifications que celle illustrée dans (2) ne présentaient pas d'avantages, autant en termes de la valeur du coefficient de détermination (R^2), de la statistique t des coefficients que du pouvoir de prédiction des valeurs de rendement vendable (y) par les différentes spécifications testées. Par conséquent, la forme illustrée dans l'équation (2) a été conservée. Celle-ci, en plus d'inclure les intrants de fertilisants et d'irrigation, prévoit le rendement marginal décroissant de l'apport azoté et, par conséquent, l'établissement d'un maximum dans la fonction de profit qui suit la fonction de production. Cette fonction de profit est déterminée en attribuant les prix des extrants et des intrants appropriés. Ainsi, la fonction de profit prend la forme suivante :

$$\pi = p \cdot f(X) - w(X) \quad (3)$$

Où π est le profit;
 p est le prix de la pomme de terre blanche²;

² Moyennes de prix de la pomme de terre blanche, vendue en vrac, de juillet 2011 à juin 2012, pour l'année de production 2011, et de juillet 2012 à mai 2013, pour l'année de production 2012. Les prix sont tels que publiés par la Fédération des producteurs de pommes de terre du Québec (<http://www.fpptq.qc.ca/prix.htm>, consulté le 29 octobre 2013).

w est le coût des intrants.

La fonction de profit est alors maximisée en en tirant la première dérivée. En égalant cette dérivée à 0, les taux optimaux de fertilisation azotée peuvent être obtenus.

$$\begin{aligned} \text{Max. } \pi &= \frac{d\pi}{dN} [p \cdot f(X) - w(X)] = 0 \\ p \cdot f_1 &= w \quad \Rightarrow \quad f_1 = \frac{w}{p} \end{aligned} \quad (4)$$

Où f_1 est la première dérivée de la fonction de production sur N, la fertilisation azotée.

À partir des résultats agronomiques obtenus dans le projet, les fonctions de production pour les années 2011 et 2012 ont pu être déterminées. Cette étape a été réalisée à l'aide du programme d'économétrie et de statistique Stata (version 12). À partir de ces fonctions de production, la fonction de profit a été maximisée pour chaque année de production et les taux optimaux de fertilisation azotée ont été calculés.

Les fonctions de productions sont les suivantes pour les années 2011 et 2012.

i) *Fonction de production – Année de production 2011 :*

$$y = 9,204429 + (0,2893579N) + (-0,0007652N^2) + (-0,0179997I) \quad (5)$$

(0,000) (0,000) (0,000) (0,990)

ii) *Fonction de production – Année de production 2012 :*

$$y = 2,734286 + (0,2085261N) + (-0,0005534N^2) + (4,1685I) \quad (6)$$

(0,117) (0,000) (0,037) (0,055)

Dans ces équations, les nombres entre parenthèses en dessous des valeurs des coefficients sont les valeurs p . Une valeur p de moins de 0,05 veut dire que la valeur du coefficient est statistiquement significative au niveau de confiance de 5 %. On constate donc que selon ces fonctions de production, l'irrigation n'a pas eu d'effet significatif sur les rendements au niveau de confiance de 5 %.

Maximisation des fonctions de profit

Dans ce contexte, la maximisation de la fonction de profit, telle qu'illustrée à l'équation (4) et pour les deux années de production, mène aux taux optimaux d'application d'azote.

iii) Taux optimaux d'application d'azote pour l'année de production 2011 :

$$f_1 = \frac{w}{p} \quad \Rightarrow \quad 0,2893579 + (2x - 0,0007652N) = \frac{w}{p}$$

$$N_{2011}^* = \frac{\left(\frac{w}{p} - 0,2893579\right)}{(2x - 0,0007652)} \quad (7)$$

iv) Taux optimaux d'application d'azote pour l'année de production 2012 :

$$f_1 = \frac{w}{p} \quad \Rightarrow \quad 0,2085261 + (2x - 0,0005534N) = \frac{w}{p}$$

$$N_{2012}^* = \frac{\left(\frac{w}{p} - 0,2085261\right)}{(2x - 0,0005534)} \quad (8)$$

Les taux optimaux d'application d'azote peuvent être obtenus selon les prix de la pomme de terre et des engrais azotés. Pour les prix moyens de la pomme de terre blanche en vrac, ceux-ci se situaient à 399,12 \$/tonne (\$/t) pour la production de 2011 et à 350,59 \$/t pour la production de 2012. Concernant les prix des fertilisants azotés, ceux-ci proviennent des Références économiques du Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ, 2013) et calculés sur la base d'un kilogramme d'azote tiré d'un engrais de formulation 27-0-0. En moyenne pour les années 2011 et 2012, ce prix s'établit à 2,28 \$ kg⁻¹³. Cependant, comme le précise le CRAAQ, ce montant ne tient pas compte des escomptes pour paiement anticipé ou sur la base des volumes commandés. Par conséquent, des taux optimaux d'application ont été calculés pour trois niveaux de prix de l'azote, soit 1,75 \$ kg⁻¹, 2,00 \$ kg⁻¹ et 2,25 \$ kg⁻¹. Les résultats sont présentés au Tableau 8.

Tableau 8. Taux optimaux d'application d'azote en fonction des prix de la pomme de terre et de l'engrais azoté

Année	Prix de la pomme de terre (\$ t ⁻¹)	Prix de l'azote (\$ kg ⁻¹)	Taux optimal de fertilisation azotée (kg ha ⁻¹)
2011	399,12	1,75	186
		2,00	186
		2,25	185
2012	350,59	1,75	184
		2,00	183
		2,25	183

À partir des résultats affichés dans le Tableau 8, il est possible de constater d'abord que les taux optimaux de fertilisation azotée ne varient pas considérablement. En effet, sur la base des prix de vente de la pomme de terre blanche des productions de 2011 et de 2012, le niveau optimal de fertilisation azotée se situe toujours autour de 185 kg ha⁻¹ et ce, sans grande variation. Aussi, les légères variations observées dépendent davantage des variations du prix de la pomme de terre que de celles du prix de l'engrais azoté.

³ [(578 \$/t + 651 \$/t) ÷ 2] ÷ 270 kg/t

Ces résultats se fondent sur les résultats agronomiques et les prix des années de production de 2011 et de 2012. Évidemment, les taux optimaux de fertilisation azotée pourraient être différents selon les conditions de marché. Or, on observe que dans le cas où le prix des engrais azotés suit proportionnellement celui de la pomme de terre, les niveaux optimaux de fertilisation azotée ne varient pratiquement pas. Par exemple, au moment de rédiger ce rapport, le prix de l'engrais 27-0-0 était de 624 \$/t avant escomptes (CRAAQ, 2013), soit 2,31 \$ kg⁻¹ N, et la moyenne de prix pour la récolte 2013 de la pomme de terre blanche se situait à près de 500 \$/t. En utilisant ces niveaux de prix et en les incluant dans les équations (7) et (8), les taux optimaux de fertilisation azotée demeurent autour de 185 kg ha⁻¹.

Il semble donc que selon les résultats agronomiques obtenus dans ce projet, les taux optimaux économiques de fertilisation azotée ne divergent pas beaucoup du niveau de 185 kg ha⁻¹. Évidemment, ce niveau de fertilisation peut varier d'une entreprise agricole à l'autre, selon les conditions pédoclimatiques. Aussi, le niveau de fertilisation doit tenir compte des risques agroenvironnementaux selon ces conditions.

3.8 Influence du taux de matière organique du sol sur le poids en tubercules et la qualité de ces derniers selon l'apport ou non d'irrigation

3.8.1 Poids en tubercules

Le taux de matières organiques (MO) a été mesuré dans chacune des 40 parcelles du dispositif expérimental en 2011 et en 2012. Le poids en tubercules de chacune de ces parcelles est également connu pour les deux saisons. Ces deux variables (poids total en tubercules et taux de MO) sont présentées pour chacune des années en deux groupes, soit selon que les parcelles aient été non irriguées (Figure 25 et Figure 27) ou aient reçu des apports en eau par l'irrigation (Figure 26 et Figure 28). Pour chacun de ces deux groupes, les 20 parcelles illustrées ont aussi été regroupées selon la dose de N reçue. Enfin, le taux de MO des parcelles est indiqué pour chacune.

En 2011, les résultats des parcelles avec ou sans irrigation sont similaires (Figure 25 et Figure 26). Pour ce qui est de la fertilisation N, hormis les poids en tubercules mesurés dans les parcelles non fertilisées en N (0) qui se retrouvent tous sous les 15 t ha⁻¹, les poids mesurés pour les autres doses de N (50 à 200 N) sont variables d'une dose à l'autre et à l'intérieur d'une même dose. En 2012, une situation similaire s'observe, mais la variation de poids entre les parcelles, sans pour autant qu'elle ait été mesurée statistiquement, semble être influencée par le taux de MO selon que les parcelles étaient irriguées ou non. En effet, globalement, en absence d'irrigation, le poids en tubercules est moindre dans les parcelles dont le taux de MO du sol est inférieur à 1,4 % comparativement à celles où le taux est supérieur à 1,6 % (Figure 27). Par contre, en présence d'irrigation, cette différence est peu présente (Figure 28) et beaucoup plus de parcelles présentent des poids se situant au-dessus de 15 t ha⁻¹. Les parcelles où un poids en tubercules et un taux de MO plus faible ont été mesurés semblent donc davantage profiter des apports en eau. Par le fait même, l'irrigation a contribué à uniformiser les rendements.

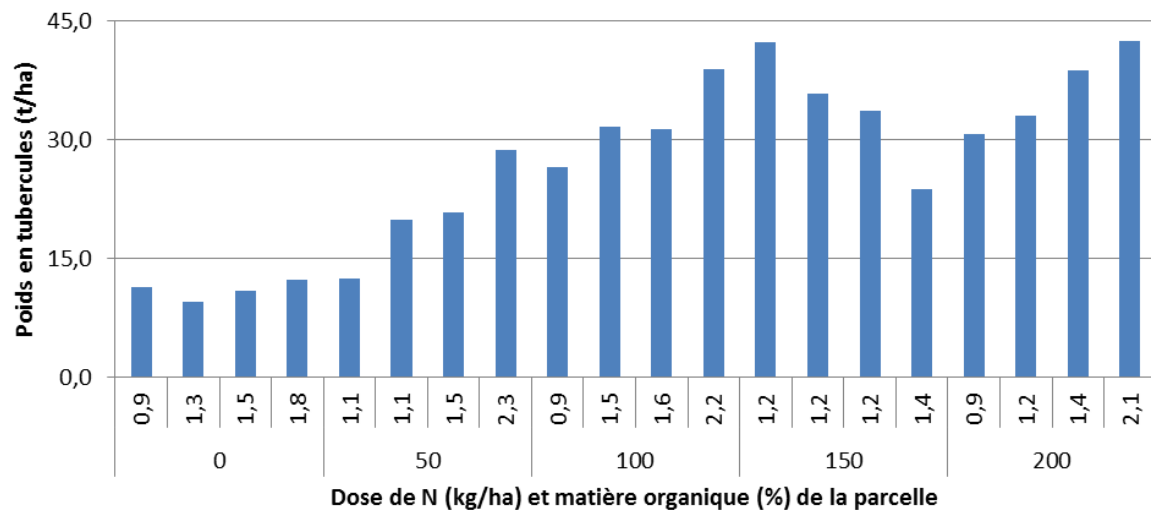


Figure 25. Poids en tubercules ($t\ ha^{-1}$) selon la dose de N ($kg\ ha^{-1}$), le taux de MO du sol (%) sans apport en eau par l'irrigation, saison 2011.

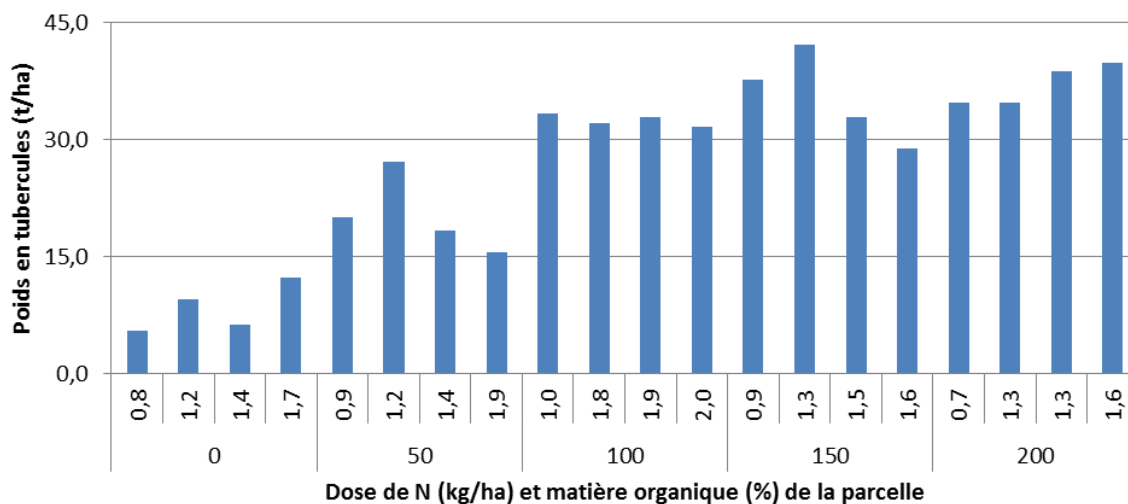


Figure 26. Poids en tubercules ($t\ ha^{-1}$) selon la dose de N ($kg\ ha^{-1}$), le taux de MO du sol (%) avec apport en eau par l'irrigation, saison 2011.

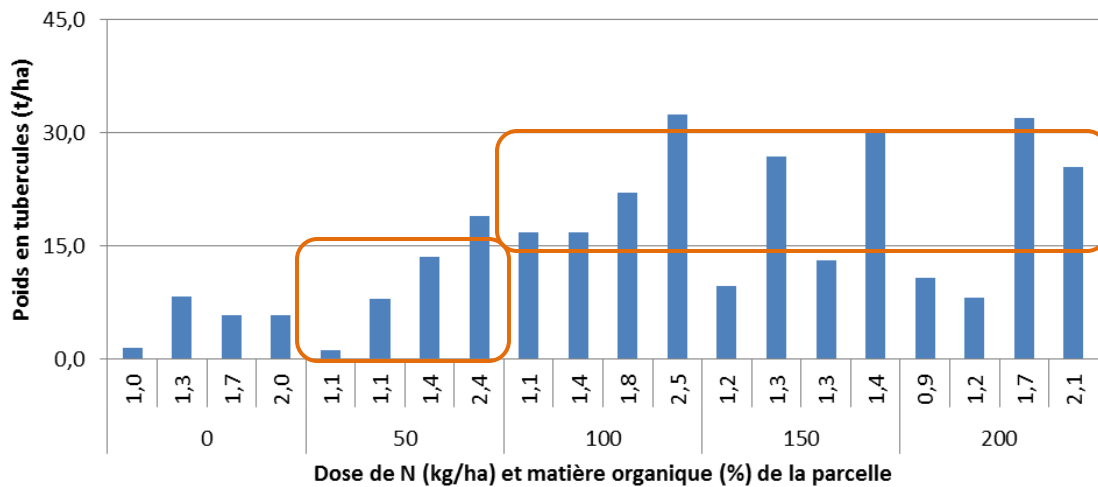


Figure 27. Poids en tubercules ($t\ ha^{-1}$) selon la dose de N ($kg\ ha^{-1}$), le taux de MO du sol (%) sans apport en eau par l'irrigation, saison 2012.

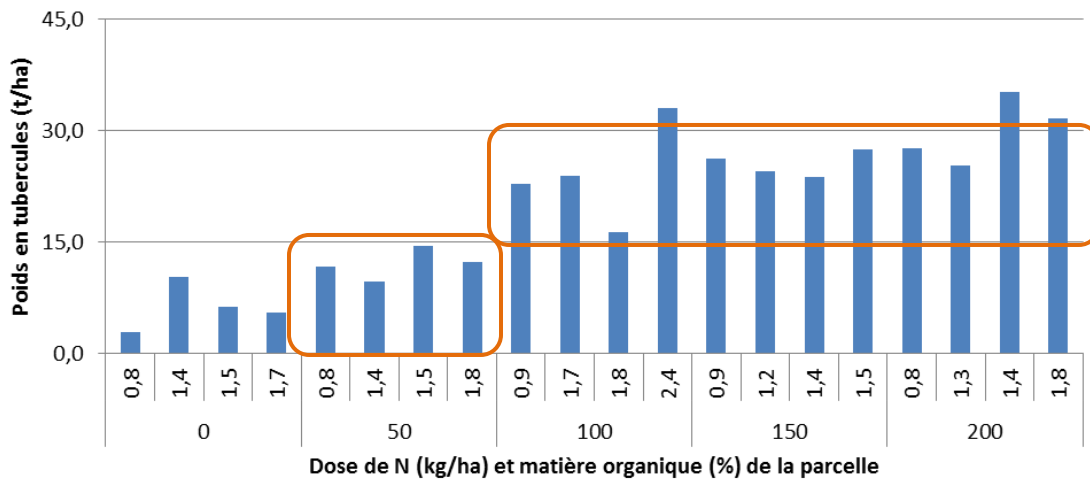


Figure 28. Poids en tubercules ($t\ ha^{-1}$) selon la dose de N ($kg\ ha^{-1}$), le taux de MO du sol (%) avec apport en eau par l'irrigation, saison 2012.

3.8.2 Poids spécifique des tubercules

Le poids spécifique moyen des tubercules récoltés au terme de la saison est présenté selon la saison, la dose de N, le taux de MO du sol de la parcelle et selon qu'il y ait eu des apports ou non en eau par l'irrigation (Figure 29 et Figure 30). Il semble y avoir, en 2012, une relation entre le taux de MO du sol et la variation du poids spécifique des tubercules. Le poids spécifique semble plus élevé dans les parcelles plus riches en MO. Toutefois, en conditions irriguées, tel qu'observé précédemment pour le poids en tubercules, le poids spécifique est plus uniforme et semble être plus élevé.

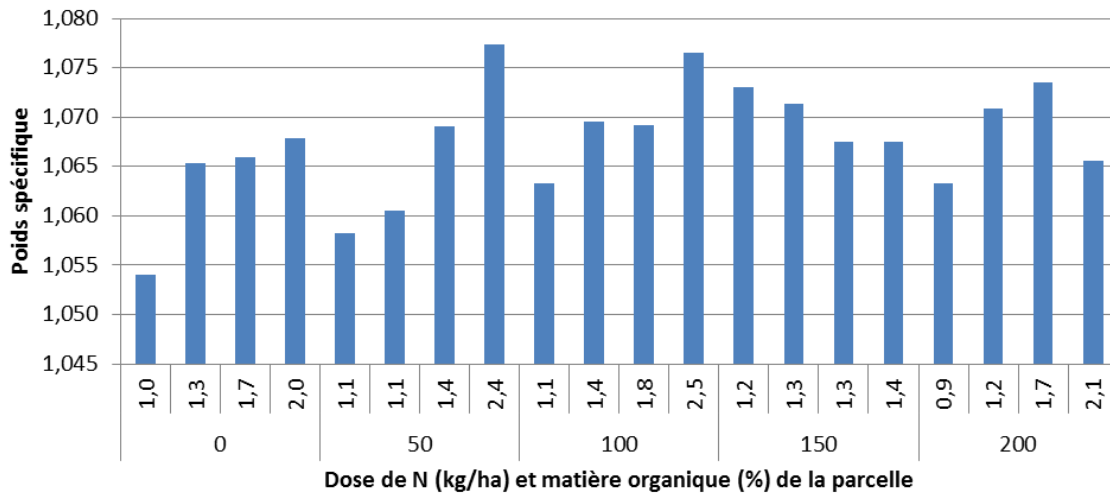


Figure 29. Poids spécifique moyen des tubercules selon la dose de N (kg ha^{-1}), le taux de MO du sol (%) sans apport en eau par l'irrigation, saison 2012.

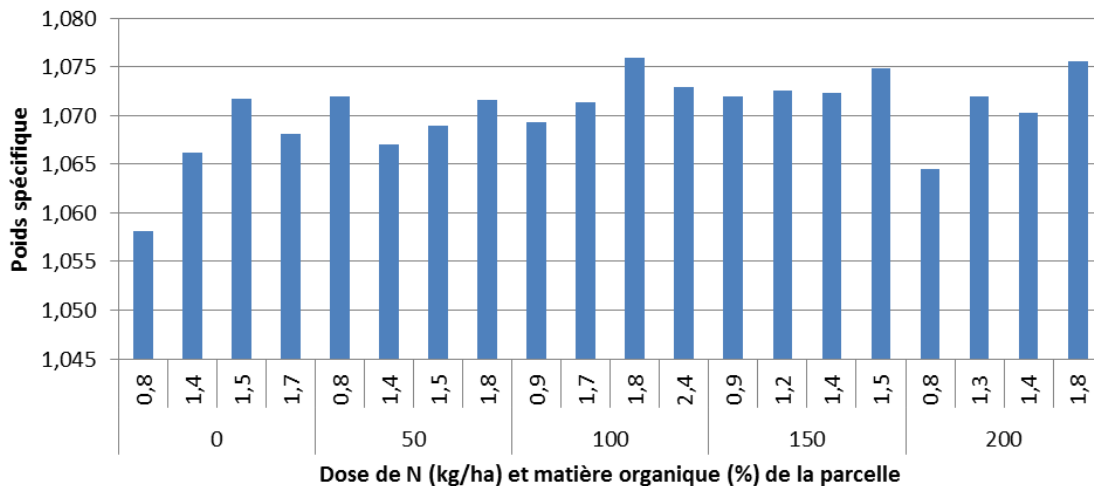


Figure 30. Poids spécifique moyen des tubercules selon la dose de N (kg ha^{-1}), le taux de MO du sol (%) avec apport en eau par l'irrigation, saison 2012.

4 CONCLUSION

Le suivi des prélèvements en N par la culture a démontré que dès la floraison, 55 % du prélèvement final est atteint. Vingt jours plus tard, les prélèvements globaux en N plafonnent. La culture utilise donc en moyenne 74 jours pour prélever le N et la période précédant la floraison est déterminante. Au même moment, les teneurs en N-NO₃ du sol atteignent leurs valeurs les plus basses. Ceci porte à se demander si les prélèvements en N par la culture n'auraient pas plafonné plus tard si la disponibilité en N-NO₃ s'était maintenue plus longtemps. En ce qui a trait à la nutrition et au développement des plants, il n'y a eu aucun bénéfice à dépasser la dose de 100 kg N ha⁻¹. Par contre, les rendements vendables ont été les plus élevés avec la dose de 150 kg N ha⁻¹ en 2011. Ceci n'a cependant pas été le cas en 2012, avec des rendements similaires à partir de la dose de 100 kg N ha⁻¹. L'année 2012 a toutefois produit des rendements beaucoup moins élevés, suggérant que des conditions autres que la fertilisation limitaient le rendement. De son côté, l'irrigation n'a pas modulé l'impact de la fertilisation N. Par contre, la fertilisation N a bel et bien modifié les besoins en eau, avec le plus grand nombre d'irrigations à la dose de N la plus élevée. Par ailleurs, l'irrigation a eu peu d'impact sur les paramètres mesurés. Toutefois, en 2012, le poids total en tubercules a été plus élevé dans les parcelles irriguées, toutes doses de N confondues. Cette situation ne s'est cependant pas reflétée sur les rendements vendables et n'a pas été observée en 2011. L'impact limité de l'irrigation peut néanmoins s'expliquer par le nombre et le moment où les épisodes ont été effectués. En 2011, l'ensemble des apports en eau par irrigation a eu lieu avant que 25 % du poids total en tubercules ait été produit (23 juillet), la balance ayant été réalisée en présence d'apports en eau suffisants par les précipitations. En 2012, le nombre d'irrigations a été deux fois plus élevé qu'en 2011. De plus, les apports ont été réalisés dans la période du 23 juin au 3 août où près de 75 % du poids total en tubercules a été atteint.

Au moment de la récolte, le meilleur coefficient d'utilisation apparente du N des engrais (CUA) a été mesuré dans les parcelles ayant reçu 100 kg N ha⁻¹, avec des CUA de 73 % et 71 % en 2011 et 2012, respectivement. Ce taux diminue rapidement par la suite à 55 % et 46 % en 2011 et 2012, respectivement, à la dose de 200 kg N ha⁻¹. L'utilisation de la dose économique optimale, calculée à 185 kg N ha⁻¹ les deux années, représente donc un compromis intéressant entre revenus et environnement. En effet, à la dose de 200 kg N ha⁻¹, 90 et 108 kg ha⁻¹ de N des engrais demeurent inutilisés. Ces quantités, non négligeables, démontrent l'importance de fertiliser de façon optimale afin de limiter au mieux la présence de nitrate résiduel à risque de lessivage. La gestion de l'irrigation est également importante à cet effet puisqu'elle a eu un impact significatif les deux années sur les contenus en N-NO₃ du sol. Selon les périodes de mesure, la hausse des teneurs en N-NO₃ du sol avec l'augmentation du taux de fertilisation était moins grande en présence d'irrigation. Une partie du N supplémentaire apporté par les doses plus grandes de fertilisant semblait donc avoir été perdue. D'ailleurs, lors de la saison 2012, ayant connu davantage d'épisodes d'irrigations, les valeurs de N-NO₃ résiduel à la récolte étaient beaucoup moins importantes dans les parcelles irriguées que dans celles non irriguées où les valeurs atteignaient de 50 à 76 kg N-NO₃ ha⁻¹ pour les doses de 100 à 200 kg N ha⁻¹, respectivement. Une part importante du N résiduel semble donc avoir été lessivée dans les parcelles irriguées en saison. En absence d'irrigation, le risque de lessivage est tout de même présent puisque les quantités résiduelles plus importantes sont très à risque de lessivage en post-récolte. De plus, la différence notable de 26 kg N ha⁻¹ entre les parcelles ayant reçu 100 et 200 kg N ha⁻¹ démontre l'importance de ne pas dépasser la fertilisation N optimale puisque le N résiduel

peut être très élevé, surtout lors d'année où les rendements sont moindres et, incidemment, les prélèvements limités.

Enfin, les résultats de cette étude démontrent l'importance de bien connaître l'état de son sol afin d'éviter les apports d'intrants (N, eau) qui seraient non nécessaires dans un sol en santé. En effet, en absence de fertilisation N, le sol a fourni à lui seul 51 et 45 kg N ha⁻¹ en 2011 et 2012, respectivement. La contribution en N d'un sol en santé peut donc être très significative. Une analyse des résultats en fonction du taux de matière organique (MO) du sol a aussi fait ressortir que lors d'une saison plus sèche comme 2012, le taux de MO a eu un impact sur le poids total en tubercules produits avec un poids plus faible dans les parcelles ayant un taux de MO inférieur à 1,4 %, comparativement à celles ayant un taux supérieur à 1,6 %. Dans les sols plus pauvres en MO, l'irrigation a permis de hausser et d'uniformiser le poids total en tubercules, avec un nombre de parcelles ayant produit entre 15 et 30 t ha⁻¹ nettement plus élevé en situation irriguée. Une situation similaire a aussi été observée pour le poids spécifique. En conclusion, il serait des plus pertinents de tester les bénéfices découlant de la fertilisation azotée et de l'irrigation sur les rendements vendables en pomme de terre selon la réserve en eau utile du sol et certains indicateurs de qualité des sols, tel que son contenu en MO et le taux de compaction afin d'éviter de compenser la dégradation du sol par une hausse des intrants.

5 BIBLIOGRAPHIE

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

American Society of Civil Engineering (ASCE), 2005. *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation.* Report of ASCE Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee, American Society of Civil Engineering, 59 p.

Bélangier, G. N. Ziadi, J.R. Walsh, J.E. Richards et P.H. Milburn. 2003. *Residual soil nitrates after potato harvest.* J. Environ. Qual. 32: 607-612.

Boivin, C. et C. Landry. 2008. *Cibler le stade phénologique optimal pour amorcer l'irrigation en lien avec le gain en pommes de terre et la perte des nitrates.* Rapport final déposé au Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec. IRDA. 51 p. (CDAQ no 6163).

Boivin, C. et C. Landry. 2011. *Impact du pilotage raisonné de l'irrigation sur l'efficacité fertilisante azotée et le rendement en pommes de terre.* Rapport final déposé au CDAQ (CADQ no 6374). IRDA. 71 p.

Boivin, C. et C. Landry. 2012. *Irrigation de la pomme de terre sous une gestion locale et globale en lien avec les rendements et la perte des nitrates.* Rapport final déposé au Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec (CDAQ no 6183). IRDA 47 p.

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.

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

CRAAQ. 2010. *Guide de référence en fertilisation du Québec.* 2^e édition. (CRAAQ). Ste-Foy, Québec. 473 p.

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

CRAAQ. 2013. *Fertilisants et amendements – Prix* (AGDEX 540/855). CRAAQ, 1 p.

Debertin, D.L. 1986. *Agricultural Production Economics.* Macmillan. 366 p.

Errebhi, M., C.J. Rosen, S.C. Gupta, et D.E. Birong. 1998. *Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management.* Agron. J. 90: 10-15.

Fortier, E. 2010. Références économiques – *Pomme de terre de table* – Budget – variétés tardives (AGDEX 258/821h). CRAAQ. 10 p.

FPPTQ. 2010a. Portrait de la production [en ligne]. Disponible : <http://www.fpptq.qc.ca/portrait.htm> (consulté le 29 octobre 2010).

FPPTQ. 2010b. *Plan d'action en agroenvironnement dans la production de pommes de terre* [en ligne]. Disponible : <http://www.fpptq.qc.ca/environnement.htm>. (consulté le 29 octobre 2010).

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).

Gasser, M.O. et M.R. Laverdière. 2000. *Influence des facteurs de production sur la régie de la fertilisation azotée de la pomme de terre*. Dans R. Landry et P. Levallois (eds.) *Agriculture intensive et écosystèmes régionaux: du diagnostic aux interventions*. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Québec, Canada. Pages 197–217.

Gasser, M.O., M.R. Laverdière, R. Lagacé et J. Caron. 2002. *Impact of potato-cereal rotation and slurry applications on nitrate leaching and nitrogen balance in sandy soils*. *Can. J. Soil Sci.* 82: 469-479.

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

Giroux, I. 2003. *Contamination de l'eau souterraine par les pesticides et les nitrates dans les régions de culture de pomme de terre*. Campagnes d'échantillonnage 1999-2000-2001. MDDPE Envirodoc ENV/2003/0233. 23 p.

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

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

Institut de la statistique du Québec (ISQ). 2013. *Superficie, production, ventes hors secteur et recettes monétaires de la pomme de terre, par région administrative, Québec*. 2013. [en ligne] <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/pommes-terre/am221013.htm> (consulté le 19 déc. 2013).

Kenney, D.R. et J.L. Hatfield. 2001. *The nitrogen cycle, historical perspective, and current and potential future concerns*. 316 p. In R. F. Follett and J. L. Hatfield, eds. *Nitrogen in the environment: sources, problems and management*. Elsevier, the Netherlands.

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 déposé au CDAQ (DS 6186). Québec, 95 p.

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

Milburn, P., J.E. Richards, C. Gartley, T.H. Pollock, H. O'Neill et H. Bailey. 1990. *Nitrate leaching from systematically tiled potato fields in New Brunswick*. Canada. J. Environ. Qual. 19: 448-454.

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

Richards, J. E., P.H., Milburn, A.A. MacLean et G. Demerchant. 1990. *Intensive potato production effects on nitrate-N concentrations of rural New Brunswick well water*. Can. Agric. Eng. 32: 189-196.

Sparks, W.C. 1972. University of Idaho College of Agriculture. Current information series 186, juin 1972.

Statistiques Canada. 2010. *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., Y.T. Galganov, B.C. Ball et M.R. Carter. 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., M. Giroux A. N'Dayegamiye. 1992. *Utilisation rationnelle des fumures azotées minérales : aspects agronomiques et environnementaux*. Agrosol. 5 (2):18-25.

Zebarth, B.J. et C.J. Rosen. 2007. *Research perspective on nitrogen BMP development for potato*. Am. J. Potato Res. 84:3-18.

6 DIFFUSION DES RÉSULTATS

- Site Internet de l'IRDA <http://www.irda.qc.ca>, depuis avril 2011.
- Journée d'information « La nutrition hydrique et minérale de la pomme de terre : une gestion unifiée pour augmenter la productivité! » organisée par l'IRDA le 29 novembre 2013, à Québec.