



Relations entre le statut hydrique du sol et les stades de développement de la pomme de terre irriguée

Rapport final

Rapport présenté au :
Conseil pour le développement de l'agriculture
du Québec (CDAQ)

Projet CDAQ # : 6761
Projet IRDA # : 901 034

Rapport élaboré par :
Christine Landry, agr., Ph.D.
Carl Boivin, agr., M.Sc.
Jérémie Vallée, agr.

Janvier 2014



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

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 assurée par Agriculture et Agroalimentaire Canada, par l'entremise du Programme canadien d'adaptation agricole (PCAA). Au Québec, la part destinée au secteur de la production agricole est gérée par le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec.



Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Agriculture and
Agri-Food Canada

i **irda**



15 ANS Relation entre le statut hydrique du sol et les stades de développement de la pomme de terre irriguée



L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) est une corporation de recherche à but non lucratif, constituée en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) et le ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE).

Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

Le rapport peut être cité comme suit :

Landry, C., C., Boivin et J. Vallée. 2014. *Relations entre le statut hydrique du sol et les stades de développement de la pomme de terre irriguée*. Rapport final remis au CDAQ. IRDA, 58 pages.

Équipe de réalisation du projet :

Répondants et responsables scientifiques : Volet nutrition minérale - Christine Landry, chercheure
Volet nutrition hydrique - Carl Boivin, chercheur

Collaborateurs : Caroline Vouligny, attachée de recherche
Danièle Pagé, technicienne agricole
Julie Mainguy, attachée de recherche
Jérémy Vallée, attaché de recherche
Stéphane Nadon, technicien agricole
Michaël Lemay, technicien agricole

Étudiants d'été Antoine Lamontagne, Ariane Blais-Gagnon, Christopher Lee,
François Douville, Hubert Labissonnière, Mireille Dubuc et
Maryse Gendron

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Christine Landry
Institut de recherche et de développement
en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-2380 #640
Courriel : christine.landry@irda.qc.ca

Carl Boivin
Institut de recherche et de développement
en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-2380 #430
Courriel : carl.boivin@irda.qc.ca

Remerciements :

Une partie du financement de ce projet a été assurée par Agriculture et Agroalimentaire Canada, par l'entremise du Programme canadien d'adaptation agricole (PCAA). Au Québec, la part de ce programme destinée au secteur de la production agricole est gérée par le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec.

Table des matières

1	SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET	1
2	INTRODUCTION	2
2.1	Mise en contexte.....	2
2.2	Objectif général	4
2.2.1	Objectifs spécifiques.....	4
3	MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	5
3.1	Matériel végétal, site expérimental et régie de culture.....	5
3.1.1	Cultivar	5
3.1.2	Site expérimental	5
3.1.3	Caractérisation chimique du sol et fertilisation	5
3.1.4	Mesures des conditions en serre	7
3.2	Gestion des apports en eau	7
3.2.1	Caractérisation physique du sol	7
3.2.2	Consigne d'irrigation	7
3.2.3	Sondes réflectométriques temporelles (TDR).....	8
3.2.4	Irrigation	8
3.3	Paramètres mesurés	8
3.3.1	Développement des plants	8
3.3.2	Prélèvements en azote.....	9
3.3.3	Statut nutritionnel des plants et mesures de chlorophylle.....	9
3.3.4	Potentiel hydrique du xylème	9
3.4	Traitements, dispositif expérimental et analyses statistiques.....	10
3.4.1	Traitements	10
3.4.2	Dispositif expérimental et analyse statistique.....	11
4	Mesurer l'impact de déficits hydriques générés à divers stades de développement de la pomme de terre.	14
4.1	Le développement végétatif (racines, plants et tubercules)	14
4.1.1	Stress hydrique et traitements	14
4.1.2	Potentiel hydrique du xylème	15
4.1.3	Poids en matière sèche des plants	17
4.1.4	Poids en tubercules	18
4.2	Le statut nutritionnel azoté des plants	24
4.3	La dynamique de l'azote disponible dans le sol.....	26
4.4	L'efficacité de l'utilisation de l'eau	29
4.5	Utilisation de l'azote	30
5	CONCLUSION.....	35
6	RÉFÉRENCES	36
7	ANNEXE	38
8	PHOTOGRAPHIES.....	40

Liste des figures

Figure 1. Résumé schématique de la période et de la durée des apports en eau (trait bleu) selon le traitement.	10
Figure 2. Schéma représentant la disposition des pots selon le traitement (T1 à T4).....	11
Figure 3. Schéma représentant la disposition des pots selon le traitement (T1 à T4) et le bloc pour chacun des stades de récolte (Émergence, Floraison, Défanage et Récolte).	12
Figure 4. Potentiel hydrique du xylème des plants (kPa) au stade floraison selon le traitement..	16
Figure 5. Potentiel hydrique du xylème des plants (kPa) au stade défanage selon le traitement.	16
Figure 6. Poids moyen en matière sèche des plants (g) selon le stade phénologique et le traitement.	18
Figure 7. Nombre moyen de tubercules produits par plant selon le stade phénologique et le traitement.	19
Figure 8. Poids moyens des tubercules produits par plant (g) selon le stade phénologique et le traitement.	20
Figure 9. Poids total moyen en tubercules par plant (g) selon le traitement et le stade phénologique.....	22
Figure 10. Évolution de l'indice de chlorophylle dans les feuilles (unité SPAD) selon le traitement.	24
Figure 11. Teneurs foliaire en N (n.s. à $P < 0,05$) au stade floraison.	25
Figure 12. Évolution de la quantité de N-NO ₃ du sol (mg kg ⁻¹ b.s.) selon le stade phénologique et le traitement.....	27
Figure 13. Évolution des teneurs en N-NO ₃ (ug/cm ² /période) mesurées par les membranes à échanges ioniques (MEI) selon le stade phénologique et le traitement (tous n.s. à $P < 0,1$).....	28
Figure 14. Efficacité de l'utilisation de l'eau par les plants (g/l).....	29
Figure 15. Évolution du prélèvement de N _{total} par les fanes (g N plant ⁻¹) selon le stade phénologique et le traitement.....	31
Figure 16. Évolution du prélèvement de N _{total} par les racines (g N plant ⁻¹) selon le stade phénologique et le traitement.....	32

Figure 17. Évolution du prélèvement de N_{total} par les tubercules (g N plant^{-1}) selon le stade phénologique et le traitement..... 33

Figure 18. Évolution du prélèvement global (fanés + racines + tubercules) de N_{total} (g N plant^{-1}) par le plant selon le stade phénologique et le traitement..... 34

Figure 19. Courbe de désorption en eau du sol « pratique »..... 38

Figure 20 Courbe de désorption en eau du sol réalisée en laboratoire selon Topp et coll. (1993).
..... 39

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractérisation physico-chimique du sol.	6
Tableau 2. Mesures effectuées selon le stade de récolte et le traitement.	13
Tableau 3. Volumes d'eau utilisés (l) selon le traitement et la période.	14

Liste des photographies

Photographie 1 Serre expérimentale au complexe scientifique du Québec.	40
Photographie 2 Prélèvement du sol destiné aux pots à l'automne 2012, Deschambault.	41
Photographie 3 Tables sur mesure en bois pour la disposition des pots dans la serre.	42
Photographie 4. Membrane d'échange ionique (MEI).	43
Photographie 5. Dispositif pour la réalisation de la courbe de désorption « pratique ».	44
Photographie 6. Installation des sondes TDR.	45
Photographie 7. Nettoyage des tubercules.	46
Photographie 8. Classement visuel des tubercules par poids.	47
Photographie 9. Montage de l'échantillon à l'intérieur de la chambre à pression.	48

1 SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET

Les entreprises productrices de pommes de terre (PdT) ont de plus en plus recours à l'irrigation. Dans un souci d'en maximiser les retombés positives, l'efficacité d'utilisation de l'eau a davantage à être considérée, surtout que le statut hydrique du sol a un impact direct sur le devenir de l'azote (N) des engrais. Ce projet avait donc comme objectif de vérifier si l'occurrence d'un déficit hydrique a une sévérité d'impact différente sur la productivité des plants de PdT selon le stade de développement auquel il se produit. Les essais ont été réalisés en serres, au Complexe scientifique du Québec à l'hiver 2013. Quatre traitements étaient à l'étude et ces derniers étaient basés sur la période au cours duquel les plants étaient soumis ou non à un stress hydrique. Ainsi, le Témoin (T1) était maintenu en situation de « confort hydrique » de la plantation jusqu'au défanage. Les apports en eau pour le T2 ont débuté à l'émergence et se sont poursuivis jusqu'au défanage. Alors que les apports en eau pour le T3, qui avaient débuté dès la plantation, ont cessé à la floraison. Enfin, le T4, n'a reçu des apports en eau satisfaisants, qu'à partir de la floraison. Il est à noter que les plants, en situation favorable aux stress hydriques, recevaient un apport en eau de « survie » lorsqu'un flétrissement était apparent. Les résultats ont démontré que la période où le stress hydrique survient à un impact majeur sur le rendement en tubercules.

Les plants du traitement témoin (T1) ont produit les rendements les plus élevés, alors que la 2^e position revient aux plants du T2, qui ont pu subir un stress hydrique jusqu'à l'émergence. Des baisses importantes de rendements ont été observées avec le T3, dont le statut hydrique du sol est devenu limitatif alors que les plants étaient à leur plein développement. La baisse de rendement s'explique par un poids moyen des tubercules plus faible. Enfin, les plants du T4, qui ont réalisé l'essentiel de leur développement en situation favorable aux stress hydriques, ont produit un nombre de tubercules plus faibles. Donc, un stress hydrique aura un impact sur le poids moyen des tubercules s'il survient à un stade avancé du développement et aura un impact sur le nombre de tubercules s'il survient au début du développement. Ces observations sont, entre autres, appuyées par l'évolution temporelle du prélèvement global (fanés, racines et tubercules) de N_{tot} . Le T4 a accusé un retard marqué à ce niveau jusqu'au moment où les conditions hydriques sont devenues favorables, mais le rattrapage est survenu trop tard. Ces résultats suggèrent qu'il serait préférable, dans un contexte où la culture est irriguée et où les ressources le permettent, que le statut hydrique du sol soit maintenu dans des conditions favorables tout au long du développement de la culture. Toutefois, si les réserves en eau ou la capacité des équipements sont des facteurs limitatifs, il faudra gérer le risque. À choisir, entre une stratégie qui peut amener à un nombre de tubercules plus faible ou à un poids moyen par tubercules plus bas.

2 INTRODUCTION

2.1 Mise en contexte

Dans un souci de protection de la ressource hydrique, avec des coûts de pompage qui ne cessent d'augmenter et la disponibilité de la ressource qui diminue, en termes de volume et de qualité, l'efficacité d'utilisation de l'eau a certainement avantage à être considérée. De plus, puisque la dynamique de l'eau a un impact direct sur le devenir de l'azote (N) des engrais minéraux, dans le même souci de protection de la ressource en eau et d'économie de coût de production, l'efficacité de l'utilisation du N doit aussi être prise en compte. L'utilisation efficace de ces deux ressources passe entre autres par la disponibilité de critères quantitatifs validés pour effectuer une irrigation raisonnée. Les apports en eau doivent être effectués au moment opportun et tenir compte à la fois des besoins de la plante, des caractéristiques du sol et des conditions climatiques.

Pour les systèmes plus extensifs où les revenus par unité de surface sont moins élevés, comparativement à des systèmes plus intensifs comme la fraise, la décision d'intervenir ou non avec l'irrigation peut avoir un impact économique important. D'autant plus que la production de pommes de terre occupe de très grandes superficies. 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 la fertilisation azotée moyenne qui est recommandée pour la pomme de terre (CRAAQ, 2010), cela signifie que 13 millions de kilogrammes de N seront épandus sur ces superficies. Une gestion inefficace de la ressource hydrique représente donc un risque notable de pollution diffuse, d'autant plus difficile à gérer que la pomme de terre est cultivée en sol sableux, très drainant. Il existe d'ailleurs plusieurs publications qui démontrent clairement qu'il y a lessivage intensif de 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). À titre d'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 nitrate qui excédait la norme de $10 \text{ mg L}^{-1} \text{ N-NO}_3$ pour l'eau potable. En fait, le lessivage du nitrate 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 nitrate lessivé de diverses régions productrices de pommes de terre vont de 10 à $200 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ (Milburn et coll., 1990; Errebhi et coll., 1998). Au Québec, Gasser et coll. (2002) ont rapporté des valeurs de lessivage de $116 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$.

Les conclusions de projets réalisés dans la pomme de terre dans la région de la Capitale-Nationale vont dans le même sens (Boivin et Landry 2008; Boivin, Landry et Caron, 2008; Boivin et Landry 2011; Landry 2011; Boivin et Landry 2012). De plus, parmi les projets cités précédemment, les conclusions de deux d'entre eux ont démontré qu'un surplus d'eau affecte négativement le rendement (Boivin et Landry, 2008; Boivin, Landry et Caron, 2008). En ce sens,

le déclenchement de l'irrigation lorsque 50 % de la réserve en eau utile du sol est épuisée s'est avéré optimal d'un point de vue environnemental et économique (Boivin et Landry, 2011). D'autres essais, comparant l'approche par bilan hydrique à celle par tensiométrie, ont permis d'identifier un potentiel d'utilisation pour une approche hybride (bilan hydrique + tensiométrie) qui serait d'autant plus intéressante pour de grandes superficies en culture (Vallée et coll., 2014).

Les résultats obtenus dans le cadre du programme de recherche de l'équipe Landry et Boivin s'intègrent tous dans une approche raisonnée de l'irrigation. De considérer le stade de développement du plant comme critère décisionnel, en plus des caractéristiques du sol en culture, est complémentaire et souhaitable afin d'améliorer la gestion des apports en eau par l'irrigation.

2.2 Objectif général

Vérifier si l'occurrence d'un déficit hydrique a une sévérité d'impact différente sur la production des plants de pommes de terre selon le stade de développement auquel il se produit.

2.2.1 Objectifs spécifiques

Mesurer l'impact de déficits hydriques générés à divers stades de développement de la pomme de terre sur:

- Le développement végétatif (racines, plants, tubercules);
- Le statut nutritionnel azoté des plants;
- La dynamique de l'azote disponible dans le sol;
- Les rendements en pommes de terre;
- L'efficacité d'utilisation de l'eau;
- L'efficacité d'utilisation de l'azote.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1 Matériel végétal, site expérimental et régie de culture

3.1.1 Cultivar

Le projet a été réalisé avec le cultivar de pomme de terre *Norland*. Ce dernier est couramment produit au Québec et les superficies en culture sont en augmentation depuis les années 2000 (MAPAQ, 2007). En plus d'être bien présent sur le marché, ce cultivar a un temps de dormance qui est parmi les plus courts, ce qui a permis de démarrer l'essai au moment voulu. La *Norland* est également reconnue comme une variété sensible à la sécheresse, ce qui est une caractéristique permettant d'assurer une bonne réponse aux différents traitements à l'étude.

3.1.2 Site expérimental

Le projet a été réalisé au Complexe scientifique du Québec (46,79° N, 71,31° O) à l'intérieur d'une serre dont le revêtement est en verre (

Photographie 1). Le volet pratique s'est déroulé du 19 février au 6 juin 2013. La température de l'air a été maintenue en moyenne à 21 °C le jour et à 17 °C la nuit. La durée du jour (éclairage naturel ou artificiel) était de 16 heures par période de 24 heures. L'essai a été réalisé en pots et ces derniers contenaient un tubercule chacun. Les pots utilisés étaient en plastique de couleur noire et avaient un volume de 50 litres (43 cm de diamètre x 38 cm de hauteur). Les pots ont été remplis avec un sol de la série Chicot dont la texture était un sable loameux provenant de la ferme expérimentale de l'IRDA à Deschambault (strate de sol 0-20 cm) (Photographie 2). La densité apparente du sol lors de l'empotage a été ajustée à la valeur mesurée au champ. Les pots étaient disposés sur des panneaux de bois supportés par tables en métal à 1 m du sol (Photographie 3). Finalement, l'eau servant à l'irrigation provenait de la source d'eau municipale de la ville de Québec.

3.1.3 Caractérisation chimique du sol et fertilisation

Le contenu en éléments majeurs et mineurs, le pH et le taux de matière organique (MO) ont été mesurés (Tableau 1). Pour ce faire, les sols ont été tamisés à 2 mm puis séchés à l'air à 21 °C. Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (CPVQ, 1988). Le C_{total} et le N_{total} ont été déterminés au LECO. Le contenu en MO totale a été calculé selon le contenu en C_{total} avec un facteur de 1,724. Le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et l'aluminium (Al) ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et Simard, 1993) et dosés à l'ICP optique.

La caractérisation a également permis de connaître les teneurs initiales du sol en $N\text{-NO}_3$ et $N\text{-NH}_4$ afin de pouvoir suivre leur évolution au cours des quatre stades de mesure (émergence, fractionnement, défanage et récolte) selon les traitements. À chacun des stades, le $N\text{-NO}_3$ et le $N\text{-NH}_4$

NH₄ ont été dosés avec la méthode standard (extraction au KCl). La teneur en nitrate (N-NO₃) au moment de la récolte a permis d'identifier le traitement qui laisse le plus de nitrate résiduel.

Tableau 1. Caractérisation physico-chimique du sol.

Série de sol	pH	M.O %	Ntot %	mg/kg										
				P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na
Chicot	5,5	2,7	0,09	423	72	639	24,3	1293	0,13	9,09	344	16,3	5,08	2,3

En parallèle, de la plantation jusqu'à la récolte, une paire de membranes d'échanges ioniques (MEI) captait en continu le N-NO₃ et N-NH₄ afin de suivre la dynamique de disponible du N du sol pendant toute la croissance des plants. La paire de MEI était constituée d'une membrane anionique pour capter le N-NO₃ (AR204-SZRA, Ionics Inc., Watertown, MA) et d'une membrane cationique pour capter le N-NH₄ (CR67-HMR, Ionics Inc. Watertown, MA). Les MEI sont de petites plaquettes en vinyle qui contiennent des groupements chargés, saturés d'un contre-ion (Photographie 4). Ce contre-ion est relâché dans le sol en échange des ions ciblés pour lesquels les groupements possèdent une affinité beaucoup plus grande. Ceci assure la sorption *in situ*, en continu, des ions ciblés par l'étude et leur retenue sur les MEI jusqu'à ce que celles-ci soient récupérées et que les ions soient extraits au laboratoire. Avant leur emploi, les MEI ont été nettoyées par agitation dans une solution de HCl 0,5N en séquence de 30 minutes. Elles ont ensuite été rincées trois fois à l'eau déminéralisée pour enlever toute trace d'acide. Puis elles ont été saturées par agitation dans une solution de NaHCO₃ 0,5M, changée aux heures pour une période de 5 heures. Les MEI ont ensuite été à nouveau rincées à l'eau déminéralisée trois fois, puis conservées dans l'eau à 4°C jusqu'à leur utilisation.

Les MEI, mesurant 5,4 x 2,4 cm, ont été placées à mi-chemin entre le rebord du pot et le tubercule. Elles ont été insérées verticalement dans le sol, à 2 cm en deçà de la profondeur de placement des tubercules, de façon à couvrir du 7° au 12° cm de profondeur dans le pot. Le temps d'action des MEI dans le sol dépendait du moment de récolte des plants, variable selon le traitement. Les périodes de contact ne sont donc pas de la même durée puisque celles-ci s'allongent avec les stades. Il n'est cependant pas possible de diviser la quantité par un nombre de jours, car la sorption des ions n'est pas constante dans le temps et seule la résultante pour une période est valable. Une fois les membranes de chacune des paires récupérées du sol, elles ont été nettoyées à l'eau déminéralisée et placées par paire dans un tube d'extraction contenant une solution de KCL 2N. Elles ont par la suite été envoyées au laboratoire pour désorber et doser les ions azotés au Technicon AA-II. Les flux de N (NO₃⁻ et NH₄⁺) ont été exprimés par unité de surface de MEI par période de contact (µg cm⁻² période⁻¹).

Les apports en fertilisants ont été fractionnés. Une partie était mise à la plantation et l'autre lorsque les plants avaient atteint le stade bouton bien développé (5 avril pour le T1 et T3 et 11

avril pour le T2 et T4). Les doses ont été établies en fonction des analyses de sol selon les recommandations du Guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ, 2010) et du cultivar utilisé pour l'essai. Ainsi, un équivalent de 80-50-160 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ et K₂O ont été apportés, respectivement, à la plantation. De plus, un ajout équivalent à de 70 kg ha⁻¹ de N a été effectué au fractionnement. En termes de quantités de N, la dose à la plantation était donc de 1,83 gr N/pot et de 1,60 gr N/pot au fractionnement pour un apport total de 3,42 gr N/pot.

3.1.4 Mesures des conditions en serre

La température et l'humidité relative de l'air ambiant ont été mesurées en continu avec une sonde de marque Campbell (HC-S3). L'intensité lumineuse (LI-200SZ, LI-COR) a également fait l'objet de mesures précises. Les appareils prenaient des lectures à intervalle de 5 minutes et étaient enregistrées par un acquisateur de données (Campbell Scientific, CR1000).

3.2 Gestion des apports en eau

3.2.1 Caractérisation physique du sol

Une première courbe de désorption en eau dite « pratique » a été réalisée à l'automne 2013 à l'aide de tensiomètres (Hortau, tx-80) et de sondes réflectométriques temporelles (Campbell Scientific, CS-610) afin d'avoir rapidement une idée de la capacité de rétention en eau du sol utilisé (Figure 19). Brièvement, cette technique consiste d'abord à remplir un cylindre, de grande dimension (30 cm), de sol et de saturée ce dernier en eau. Par la suite, le cylindre est déposé sur un papier buvard de sorte que le sol s'assèche, puis à effectuer des mesures en continues du statut hydrique (

Photographie 5). La courbe de désorption « pratique » est finalement obtenue en mettant en relation les valeurs mesurées simultanément par les deux tensiomètres et la sonde TDR. De plus, une autre courbe de désorption en eau du sol a été réalisée, selon la méthode conventionnelle, à l'aide d'une table à tension et de marmites à pression (Topp et coll., 1993) (Figure 20). Finalement, des analyses granulométriques ont été réalisées en laboratoire par la méthode de l'hydromètre en six points suivis d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986).

3.2.2 Consigne d'irrigation

Un pot était irrigué lorsque 50 % de la réserve en eau utile du sol était épuisée, à condition que les apports en eau soient permis par le traitement au moment en question. Les conclusions d'un projet réalisé à la station de recherche de Deschambault en 2009 et 2010 ont identifié cette consigne comme étant celle s'étant avérée optimale d'un point vu environnemental et économique (Boivin et Landry, 2011).

3.2.3 Sondes réflectométriques temporelles (TDR)

Le suivi du statut hydrique du sol était assuré par un réseau de sondes TDR (de l'anglais *Time Domain Reflectometry*) permettant de suivre l'évolution temporelle de la teneur en eau du sol dans chacun des pots. Ce système, dont les instruments proviennent de la compagnie Campbell Scientific, est principalement constitué de sondes CS605L et CS610L reliées à des multiplexeurs SDMX50, ceux-ci étant à leur tour reliés à un TDR100 et finalement, à un acquiiseur de données CR1000. Les mesures ont été enregistrées sur l'acquiiseur aux 5 minutes entre 6 et 18 h et aux 60 minutes entre 18 et 6 h. Un ordinateur était connecté en permanence à cet acquiiseur de données afin de visualiser l'évolution du statut hydrique du sol de chacun des pots en temps réel à l'aide du logiciel *LoggerNet*. Les sondes TDR ont été insérées horizontalement dans les pots et à environ 15 cm du fond, soit environ 6 cm sous le planton (Photographie 6).

3.2.4 Irrigation

Deux types d'irrigation ont été utilisés durant les essais. Un premier type « confort hydrique » avait comme objectif de maintenir la réserve utile en eau (RU) du sol à un seuil d'au moins 50 % et était utilisé lorsque le traitement requerrait des apports en eau par l'irrigation. L'ajout d'un second type « survie » a été nécessaire afin de maintenir les plants en vie. En effet, un apport en eau était effectué aux plants non irrigués lorsque ces derniers étaient dans un état de flétrissement visuellement apparent. L'eau était appliquée avec un arrosoir de jardin et le volume appliqué (confort hydrique) était déterminé de sorte à ramener la teneur en eau du sol à la capacité au champ (CC).

3.3 Paramètres mesurés

3.3.1 Développement des plants

Un suivi du développement végétatif des plants a été effectué à quatre stades de développement (Émergence, Floraison, Défanage et Récolte). Ce suivi consistait d'abord à mesurer le poids en matière sèche (MS) des parties aériennes et des racines des plants aux quatre stades. Les parties aériennes ont été coupées et séchées à 65°C (Photographie 7). Les racines ont été récupérées par tamisage du sol et rinçage à l'eau et ont également été séchées à 65°C. Ces échantillons de plants et de racines ont ensuite été pesés, puis soumis à l'analyse pour connaître leur contenu en N_{total} . Dans le cas des tubercules, ceux-ci ont été récoltés aux trois derniers stades de développement. Les tubercules ont été dénombrés, pesés frais (exprimée en poids total et moyen) et classés par catégories de poids, puis séchés pour établir leur contenu en matière sèche et analysés pour connaître leur contenu en N_{total} (Photographie 8). De plus, les tubercules pesant moins de 1 g ont été exclus de l'analyse. Dans tous les cas, les parties végétales ont été broyées à 100 mesh pour permettre l'extraction du N_{total} selon la méthode Kjeldahl (Isaac et Johnson, 1976). Le N_{total} a été dosé par colorimétrie automatisée sur autoanalyseur Technicon.

3.3.2 Prélèvements en azote

Les valeurs de poids en matière sèche (MS) et celles du contenu en N_{total} dans les différentes parties du plant (fanés, racines et tubercules) ont permis de faire un bilan précis du prélèvement (PVL) total en N par les plants. Ce prélèvement a été calculé en multipliant la MS par la teneur en N (%) de chacune des parties, donnant une image précise de l'utilisation du N par les plants et permettant de comparer cette utilisation aux doses de N apportées par les engrais. Les calculs des prélèvements de N_{total} ont été réalisés comme suit :

Prélèvements à chacun des stades de la quantité de N_{total} retrouvé dans les fanés, les racines ou les tubercules:

$$\text{PVL } N_{\text{total}} \text{ plant/racine/tuberc.} = \text{MS plant/racine/tuberc.} * \text{concentration en } N_{\text{total}} \text{ plant/racine/tuberc.}$$

Quantité totale finale de N_{total} prélevé par l'ensemble du plant :

$$\text{PVL } N_{\text{total}} \text{ total plant} = \text{PVL } N_{\text{total}} \text{ fane} + \text{PVL } N_{\text{total}} \text{ racine} + \text{PVL } N_{\text{total}} \text{ tubercule}$$

3.3.3 Statut nutritionnel des plants et mesures de chlorophylle

Au stade floraison, le N_{total} de la 4^e feuille mature a été dosé et utilisé comme indice nutritionnel. L'indice de chlorophylle des feuilles a également été mesuré par spectrométrie avec un lecteur SPAD-502Plus de Minolta (Spectrum Technology Inc., IL, USA) à intervalle de sept jours, à partir de l'émergence jusqu'au défanage. Le SPAD est un radiomètre manuel dont la mesure correspond à un rapport entre les réflectances de la feuille dans le rouge (650 nm) et le proche infrarouge (940 nm). Cela revient à mesurer un indice de végétation de l'état azoté ou chlorophyllien de la feuille (Luquet et coll., 2003).

3.3.4 Potentiel hydrique du xylème

Le potentiel hydrique du xylème a été mesuré à deux reprises, soit aux stades floraison et défanage. Pour ce faire, une chambre à pression (Soilmoisture Equipment Corp., 3005) a été utilisée. Trois feuilles ont été prélevées dans le dernier tiers supérieur sur chacun des plants et ces dernières ont été soumises au test (Photographie 9). Le délai entre le prélèvement et l'insertion du tissu végétal dans la chambre de pression est très court. Une fois l'échantillon correctement installé, une pression croissance est alors exercée sur l'échantillon jusqu'au point où la pression présente dans la chambre soit supérieure à celle qui a dans le xylème du tissu végétal. À ce point, l'eau est entraînée vers l'extérieur de la feuille et est visible à l'endroit où le pétiole a été coupé. À ce moment, la pression du gaz dans la chambre est mesurée par un manomètre installé sur l'appareil.

3.4 Traitements, dispositif expérimental et analyses statistiques

3.4.1 Traitements

Les quatre traitements qui étaient à l'étude sont présentés à la Figure 1. Ceux-ci étaient basés sur le stade de développement (Plantation, Émergence, Floraison et Défanage). Chacun représentait la période au cours de laquelle le développement des plants se déroulait dans des conditions où le statut hydrique du sol était, ou non, propice à un stress hydrique (déficit). Par exemple, en ce qui a trait au traitement T1, la RU du sol a été maintenu à au moins 50 % et ce, de la plantation jusqu'au défanage, alors que pour le traitement T4, la RU du sol n'a été maintenu à ce seuil qu'entre la floraison et le défanage.

T1 - Témoin;

T2 - Irrigués uniquement à partir de l'émergence et jusqu'au défanage;

T3 - Déficit hydrique à partir de la floraison;

T4 - Déficit hydrique jusqu'à la floraison.

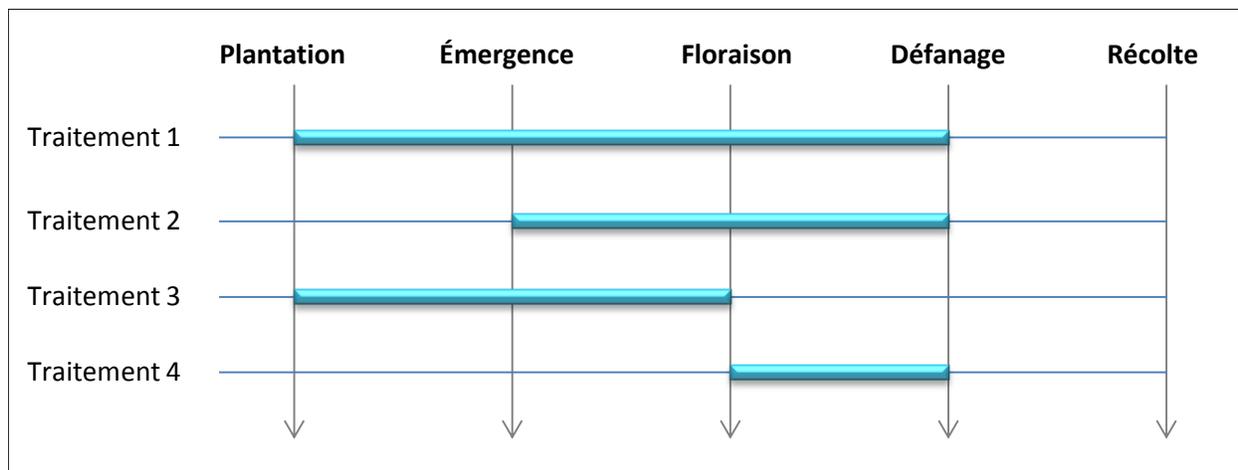


Figure 1. Résumé schématique de la période et de la durée des apports en eau (trait bleu) selon le traitement.

3.4.2 Dispositif expérimental et analyse statistique

Deux facteurs étaient à l'étude dans ce projet. En parcelle principale, il y avait les quatre périodes au terme desquelles (Émergence, Floraison, Défanage et Récolte) une répétition de chacun des traitements (T1 à T4) était détruite. La destruction de ces unités expérimentales était nécessaire pour mesurer les paramètres souhaités. Maintenant, en sous-parcelles, il y avait les quatre traitements d'irrigation (T1 à T4). Le dispositif expérimental était donc un plan en tiroirs subdivisés (split-plot) et comportait quatre blocs. Il y avait un total de 64 pots ou unités expérimentales (Figure 2 et Figure 3). Enfin, l'analyse de la variance a été effectuée avec la procédure MIXED de SAS (Littell et coll., 2006).

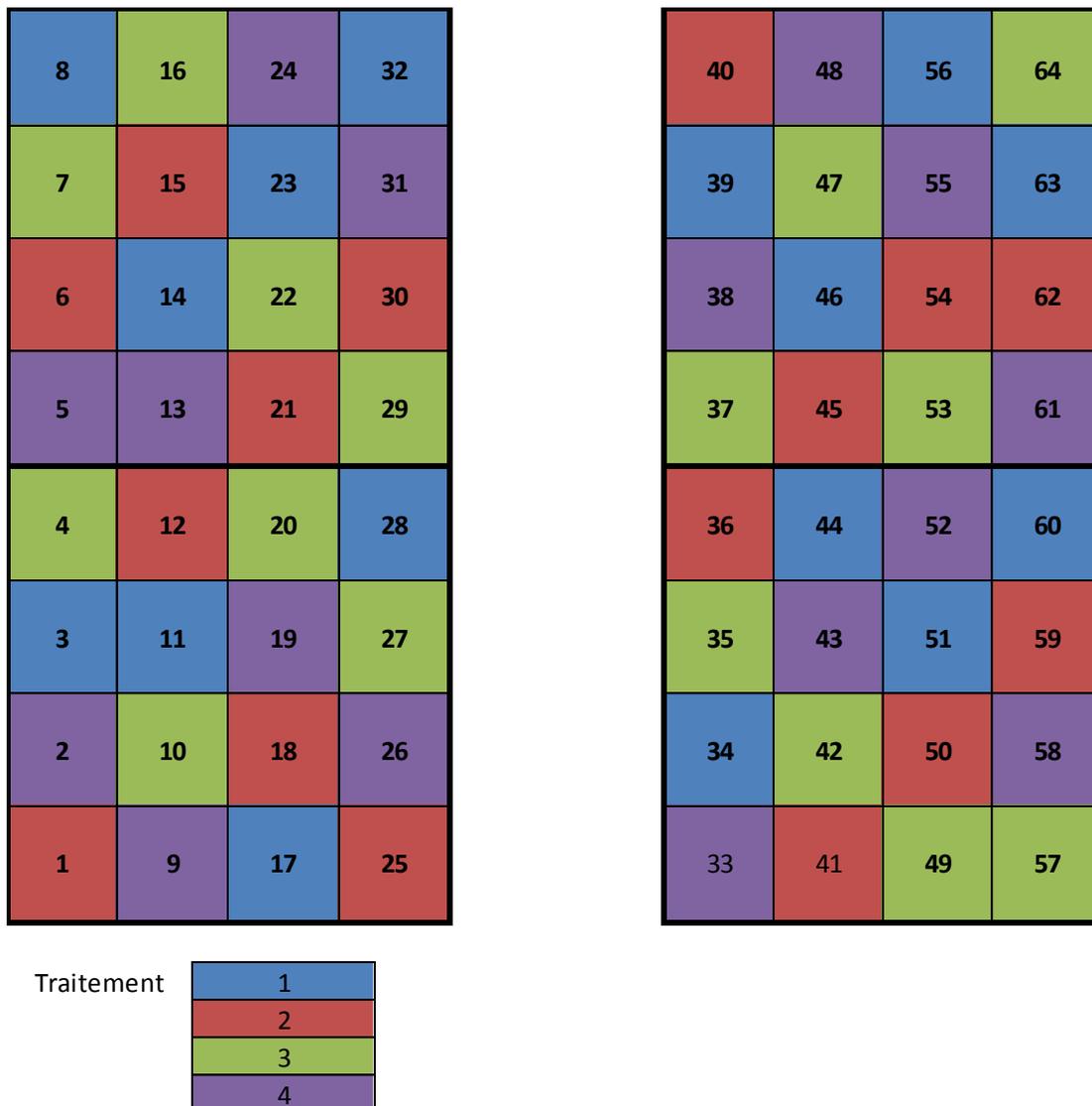


Figure 2. Schéma représentant la disposition des pots selon le traitement (T1 à T4).

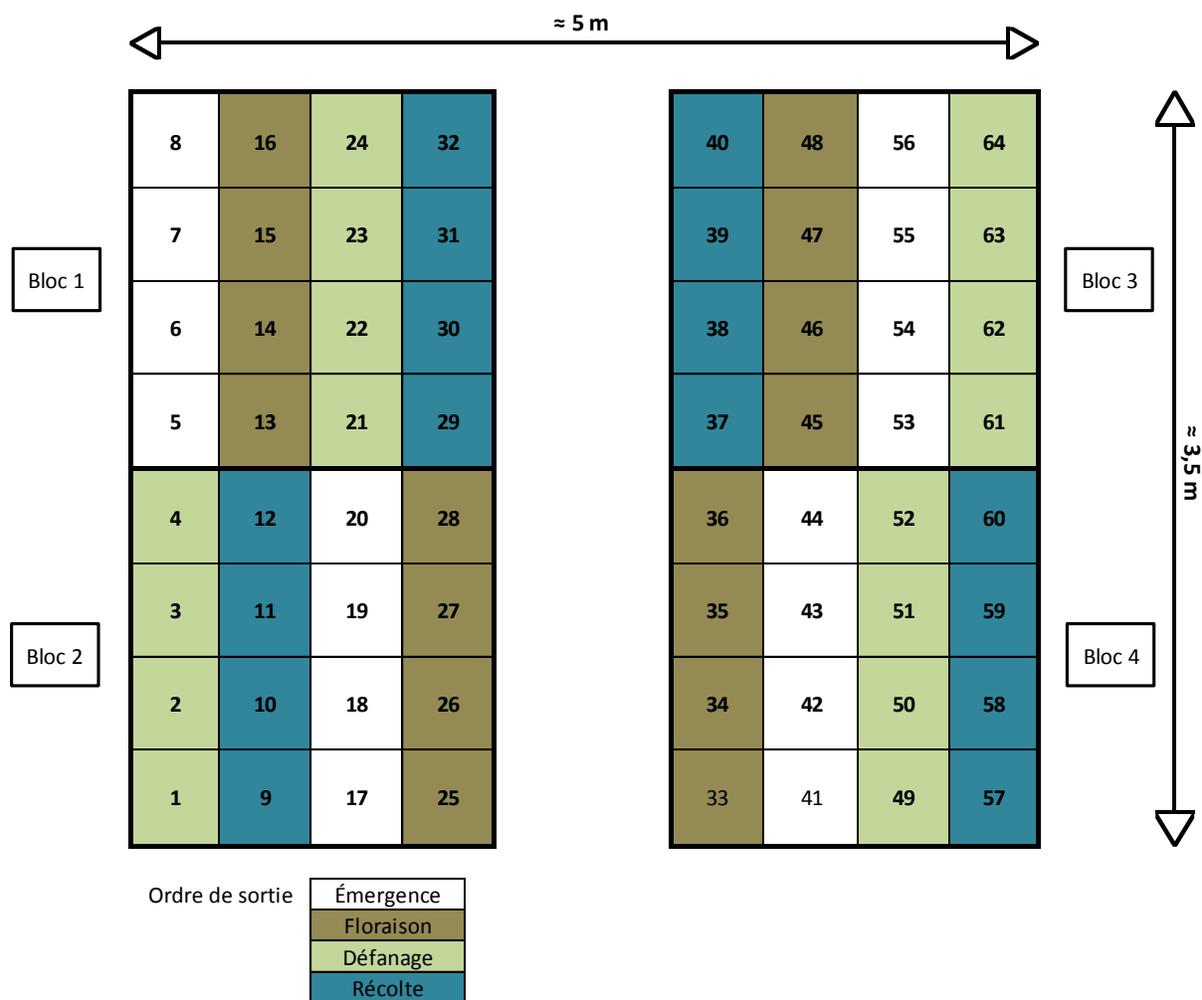


Figure 3. Schéma représentant la disposition des pots selon le traitement (T1 à T4) et le bloc pour chacun des stades de récolte (Émergence, Floraison, Défanage et Récolte).

Les paramètres qui ont été mesurés tout au long de la saison de croissance sont résumés au Tableau 2. Ces derniers sont présentés selon le stade de récolte (destruction de l'unité expérimentale) et les pots y correspondants. Par exemple, au stade Émergence, des lectures de chlorophylle ont été faites sur les 64 unités expérimentales. Ensuite, pour les 16 pots visés à Émergence, ces derniers ont été sortis de la serre pour y mesurer le poids en matière sèche des racines et des parties aériennes, ainsi que leur contenu en N.

Tableau 2. Mesures effectuées selon le stade de récolte et le traitement.

Stade de récolte	Traitement	# Pot	Masse sèche des racines	Masse sèche des plants	Bilan total de l'azote	N minéral disponible du sol	Indice nutritionnel	Mesure de chlorophylle	Potentiel hydrique du xylème	Récolte en tubercule
Émergence	1	8, 17, 44, 56	X	X	X	X		Tous les pots		
	2	6, 18, 41, 54	X	X	X	X				
	3	7, 20, 42, 53	X	X	X	X				
	4	5, 19, 43, 55	X	X	X	X				
Floraison	1	14, 28, 34, 46	X	X	X	X	X	Tous les pots	X	X
	2	15, 25, 36, 45	X	X	X	X	X		X	X
	3	16, 27, 35, 47	X	X	X	X	X		X	X
	4	13, 26, 33, 48	X	X	X	X	X		X	X
Défanage	1	3, 23, 51, 63	X	X	X	X		Tous les pots	X	X
	2	1, 21, 50, 62	X	X	X	X			X	X
	3	4, 22, 49, 64	X	X	X	X			X	X
	4	2, 24, 52, 61	X	X	X	X			X	X
Récolte	1	11, 32, 39, 60	X	X	X	X				X
	2	12, 30, 40, 59	X	X	X	X				X
	3	10, 29, 37, 57	X	X	X	X				X
	4	9, 31, 38, 58	X	X	X	X				X

4 Mesurer l'impact de déficits hydriques générés à divers stades de développement de la pomme de terre.

4.1 Le développement végétatif (racines, plants et tubercules)

4.1.1 Stress hydrique et traitements

Les traitements ont reçu des quantités variables d'eau afin d'atteindre l'état hydrique du sol voulu. Ainsi, des volumes d'eau ont été utilisés soit pour maintenir les plants en vie (cases blanches) ou pour assurer un statut hydrique optimal (cases bleues) (Tableau 3). Le volume d'eau utilisé varie respectivement entre 49,5 et 73,5 litres pour les T3 et T1. Étant donné que le T4 subissait davantage de périodes de stress (2 périodes blanches contre une seule pour les autres), les volumes destinés à la survie des plants ont été plus importants que les autres traitements. Toutefois, le volume total utilisé par le T4 est légèrement plus élevé que le T3. Il est à noter que les plus grands volumes totaux d'eau ont été appliqués entre la Floraison et le Défanage. Cela s'explique par un développement plus important des plants à ces stades. Prenons comme exemple le T1 qui a reçu des apports en eau tout au long de son développement, la proportion du volume total reçu entre la Floraison et le Défanage est de 61 % celle reçue pour la durée totale de l'essai. Conséquemment, il est attendu qu'en termes de litres d'eau appliqués, le T4 puisse dépasser le volume reçu par le T3, qui lui n'avait plus d'apport en eau « confort hydrique ».

Tableau 3. Volumes d'eau utilisés (l) selon le traitement et la période.

Traitements	Stades phénologiques					Total (l)
	Plantation	Émergence	Floraison	Défanage	Récolte	
1	8,5	20	45	0	73,5	
2	3	26	39	0	68,0	
3	8,5	20	21	0	49,5	
4	3	19,5	32	0	54,5	

Note : les cellules en bleues représentent les moments où les plants sont dans une zone de « confort hydrique ».

4.1.2 Potentiel hydrique du xylème

L'eau contenue dans les plantes est essentielle à leur survie et remplit plusieurs fonctions générales (solvant pour les ions et molécules organiques, structurantes pour les protéines, substrat aux réactions enzymatiques, etc.). L'eau a également d'autres fonctions mécaniques importantes comme le transport des solutés, le transport de la chaleur (processus d'évapotranspiration), la croissance cellulaire (pression de turgescence). À lui seul, le processus d'évapotranspiration utilise plus de 90 % de l'eau prélevée par la plante. La plante doit alors constamment renouveler ses réserves en eau pour assurer les fonctions vitales y étant associées. Lorsque l'eau est facilement disponible dans le sol, la tension mesurée dans le xylème est basse. À l'inverse, plus le sol est sec, plus la tension de l'eau dans le xylème sera élevée, car la plante doit exercer davantage de tension pour arracher l'eau aux particules de sol. Par ailleurs, en absence de transpiration par la plante, la tension de l'eau mesurée dans le sol devrait être égale à celle présente dans le xylème de la plante. Donc, en mesurant la tension au sein du xylème, il est possible de mesurer le stress hydrique de la plante.

En mesurant le potentiel hydrique du xylème à différentes périodes, il a été possible de vérifier si les traitements occasionnaient un stress hydrique sur les plants (Figure 4 et Figure 5). À la Floraison, un stress hydrique devrait normalement être mesuré sur les plants du T4 uniquement puisque les plants des autres traitements se développaient dans des conditions hydriques de sol non limitatives. Par contre, l'analyse des résultats de cette période ne permet pas d'établir clairement ce lien. Il est possible que les conditions en serre observée lors du test (journée ensoleillée) n'aient pas été favorables à la prise de mesures représentatives. Au stade Défanage, une autre série de mesures a été effectuée avec des résultats beaucoup plus clairs. À ce stade, le T3 aurait normalement dû être en stress hydrique, ce qui est visuellement démontré à la Figure 5. Contrairement à la première série de tests, la journée était nuageuse ce qui a probablement diminué l'évapotranspiration des plants et ainsi faciliter la prise de données en maintenant des conditions plus uniformes.

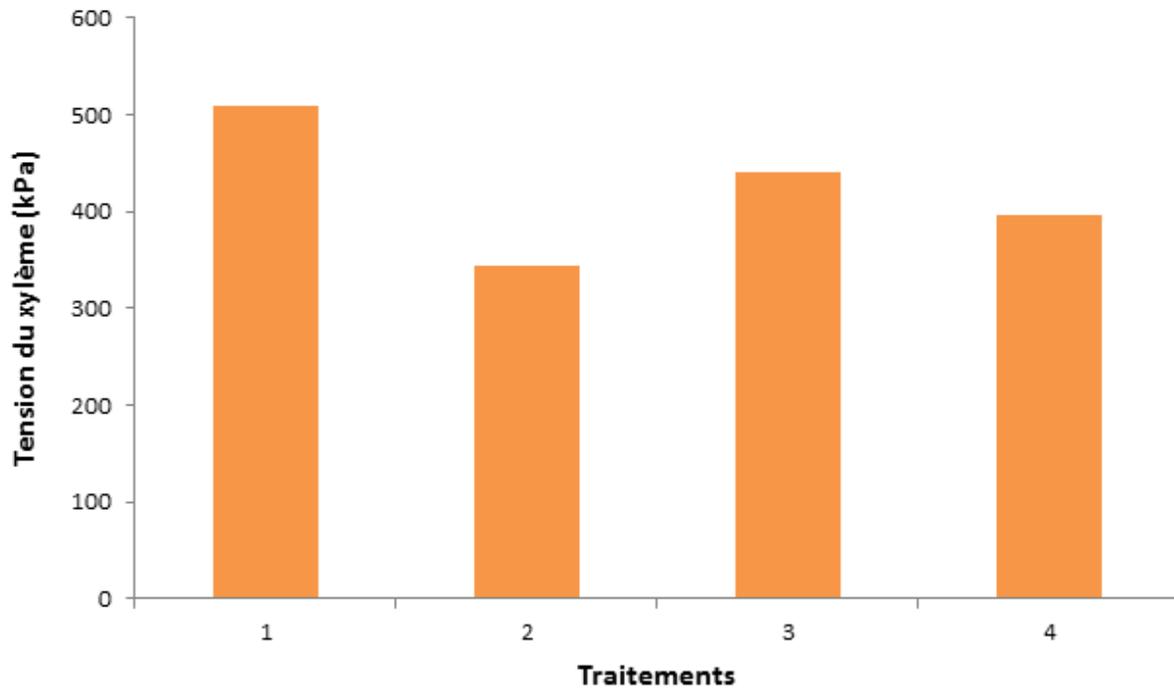


Figure 4. Potentiel hydrique du xylème des plants (kPa) au stade floraison selon le traitement.

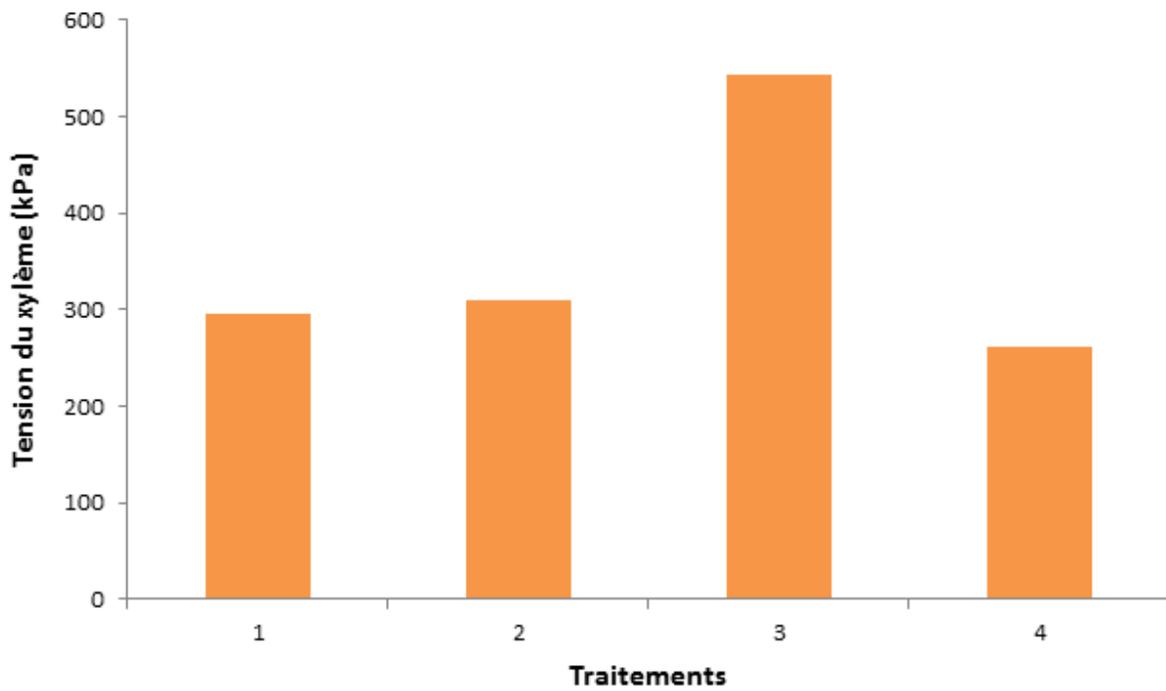


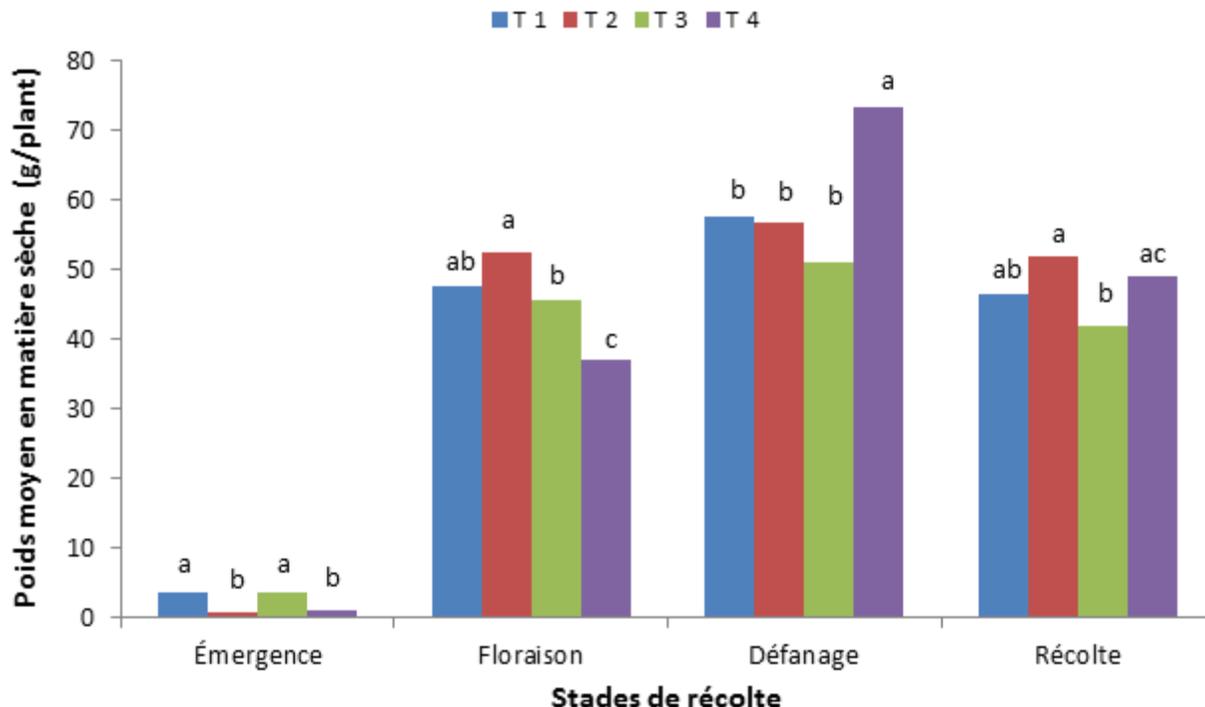
Figure 5. Potentiel hydrique du xylème des plants (kPa) au stade défanage selon le traitement.

4.1.3 Poids en matière sèche des plants

Entre les différents organes d'une plante, il existe une relation de producteur-consommateur (organes sources, organes puits) en ce qui a trait aux composés créés lors de la photosynthèse (photoassimilats). Les organes sources tels que les feuilles produisent davantage d'assimilats que nécessaire pour leurs propres besoins, tandis que les organes puits (jeunes organes, racines, tubercules) les entreposent et les consomment. En réalité, les feuilles matures d'une plante vont exporter une grande partie du carbone qu'elles assimilent grâce à la photosynthèse (Hopkins, 1995). Donc, le potentiel de production de tubercules de pomme de terre est lié à la production des assimilats fournis par l'activité photosynthétique des feuilles. De manière générale, le poids en matière sèche des parties aériennes peut devenir un indicateur de productivité des organes puits.

Il existe des différences significatives pour les facteurs Traitement et Période, ainsi que pour l'interaction Traitement x Période au seuil de $P = 0,0472$, $< 0,0001$ et $0,0002$, respectivement. La présence d'une interaction significative entre les traitements et les périodes indique que le poids en matière sèche des plants entre les traitements peut être différent et que cette différence est variable d'une période à l'autre. La Figure 6 présente le poids en matière sèche des plants selon la période (stades phénologiques) pour chacun des quatre traitements. Il est intéressant de constater qu'il existe des différences significatives entre les traitements. En effet, au stade Floraison, les différences significatives surviennent entre les T1 et T3 et entre l'ensemble des traitements et le T4. À ce stade, il est plausible de croire que le stress hydrique engendré par le traitement a nettement désavantagé les plants du T4 par rapport aux plants des autres traitements. En contrepartie, le poids en matière sèche des plants du T4 par rapport aux 3 autres traitements a été significativement plus important au stade Défanage (contraste significatif à $P < 0,01$). Ce contraste peut s'expliquer par le statut hydrique du sol et des réactions physiologiques au sein même des plants du T4. Tel que mentionné précédemment, le T4 ne parvient pas à produire autant de biomasse sèche durant les périodes antérieures à la floraison. Entre le stade Floraison et Défanage, les plants du T4 commencent à recevoir des volumes d'irrigation permettant de maintenir le statut hydrique du sol à un niveau optimal. La réponse physiologique des plants à ces nouvelles conditions environnementales se traduit par une bonne croissance des jeunes organes puits (le feuillage) et des organes de circulation de la sève. Au stade Défanage, les plants des autres traitements, qui ont déjà un feuillage mature et fourni, transloquent les photoassimilats vers les organes de réserves (processus de tubérisation). Finalement, à la récolte, certaines différences observées lors des périodes antérieures sont accentuées ou résorbées. En effet, il n'y a plus de différences significatives entre les T1, T2 et T4 tandis que le T3 est significativement différent du T2 et du T4 au seuil de $P = 0,0157$ et $P = 0,0688$, respectivement.

Le poids en matière sèche des racines a aussi fait l'objet d'analyses statistiques. Par contre, ces analyses n'ont révélé aucune différence significative pour les facteurs Traitement, ainsi que pour l'interaction Traitement x Période au seuil de $P = 0,33$, $0,27$, respectivement.



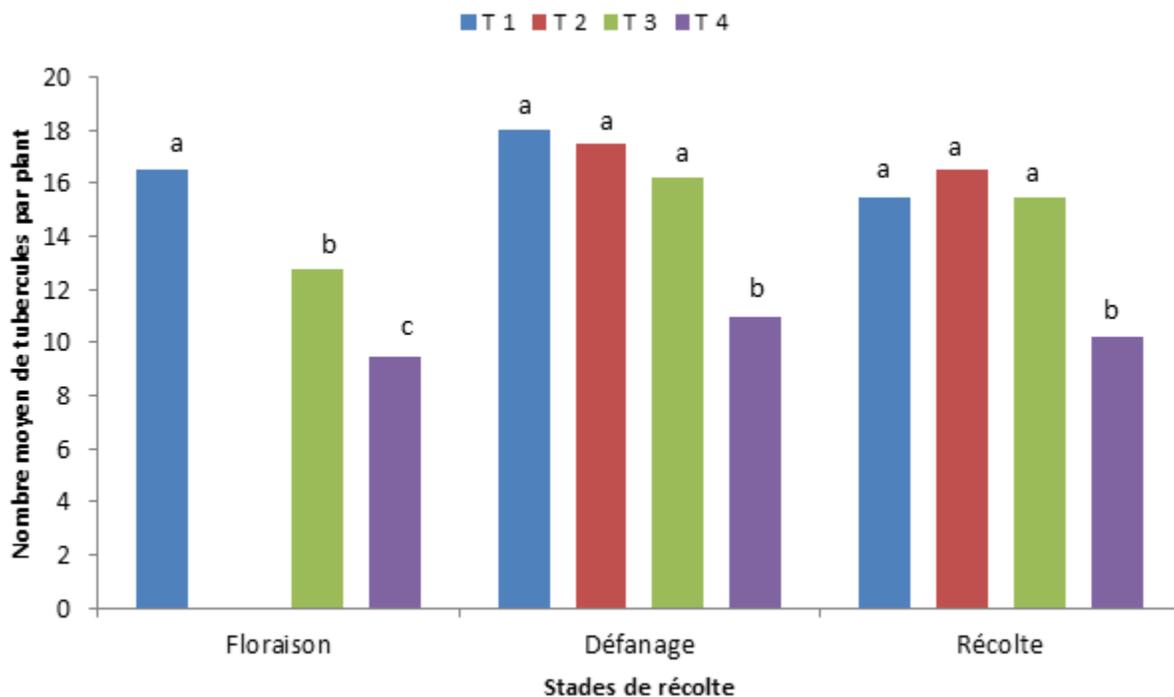
Les colonnes se portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à l'exception des lettres a et b au stade floraison ainsi que b et ac au stade récolte qui demeurent statistiquement différentes au seuil de $P < 0,1$.

Figure 6. Poids moyen en matière sèche des plants (g) selon le stade phénologique et le traitement.

4.1.4 Poids en tubercules

Lors de la destruction des unités expérimentales, le nombre de tubercules a pu être mesuré aux stades Floraison, Défanage et Récolte. Il y a une différence significative dans la combinaison entre le Traitement et la Période au seuil de $P < 0,001$. La Figure 7 présente le nombre moyen de tubercules récoltés par plant selon le stade phénologique de récolte et les traitements. Le nombre moyen de tubercules produits par plant pour le T4 a été statistiquement inférieur à celui des trois autres traitements à l'étude, et ce, pour l'ensemble des stades de récolte (différences significatives au stade Floraison ; T1 et T3, T1 et T4, T3 et T4 aux seuils respectifs de $P = 0,0552$, $0,0008$, $0,0941$, au stade Défanage ; T1 et T4, T2 et T4, T3 et T4, aux seuils respectifs de $P = 0,0008$, $0,0017$, $0,009$, au stade Récolte ; T1 et T4, T2 et T4, T3 et T4, aux seuils respectifs de $P = 0,009$, $0,0023$, $0,009$). Le stress hydrique imposé aux plants du T4, entre le moment de la Plantation jusqu'au stade Défanage, a clairement influencé le nombre de tubercules produits par les plants. Il est donc hautement probable que le stress hydrique engendré durant cette période a négativement influencé la réponse hormonale des feuilles, qui commandent la production des organes de stockage (tubercules). Il ne demeure pas moins intéressant de constater que le nombre de tubercules produits par le T2 et le T3 n'a pas été

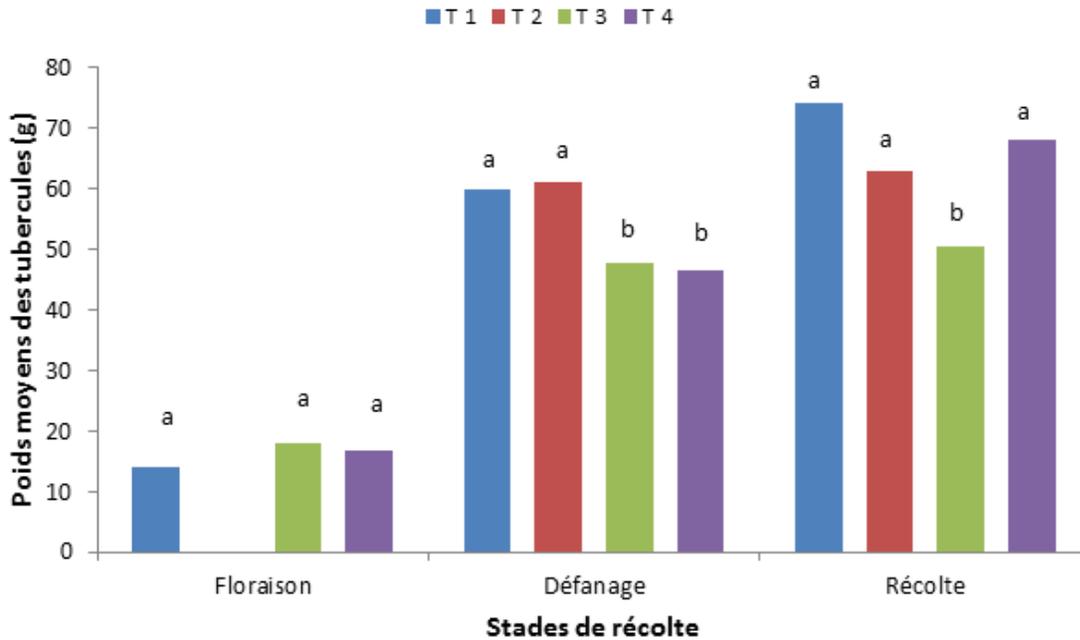
significativement différent du T1 ni au stade Défanage ni au stade Récolte. Cela indique alors que le stress hydrique survenu entre la Plantation et l'Émergence (T2) ou entre la Floraison et le Défanage (T3) a eu un effet, non significatif, sur le nombre moyen de tubercules produits par les plants durant cette période. Ces résultats sont également en lien avec les stades phénologiques et les processus physiologiques s'y rattachant tel que décrit par le code du BBCH (Meier, 2001). En effet, le gonflement des stolons marque le début de la tubérisation et se produit dès le stade Émergence de la pomme de terre. Par la suite, les tubercules grossissent et atteignent près de 30 % de leur poids final au stade Floraison. Ces constats indiquent donc que le statut hydrique du sol, durant la période entre le stade Émergence et Floraison, est crucial dans la détermination du nombre futur de tubercules produits lors des premières phases de tubérisation.



Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,01$ à l'exception des lettres a, b et c pour lesquelles le seuil a été établi à $P < 0,1$.

Figure 7. Nombre moyen de tubercules produits par plant selon le stade phénologique et le traitement.

En ce qui a trait au poids moyen des tubercules, les analyses statistiques ont montré qu'il y a une différence significative dans la combinaison entre le Traitement et la Période au seuil de $P < 0,0001$. La Figure 8 expose les poids moyens des tubercules selon les traitements et le stade de récolte.



Les colonnes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,1$.

Figure 8. Poids moyens des tubercules produits par plant (g) selon le stade phénologique et le traitement.

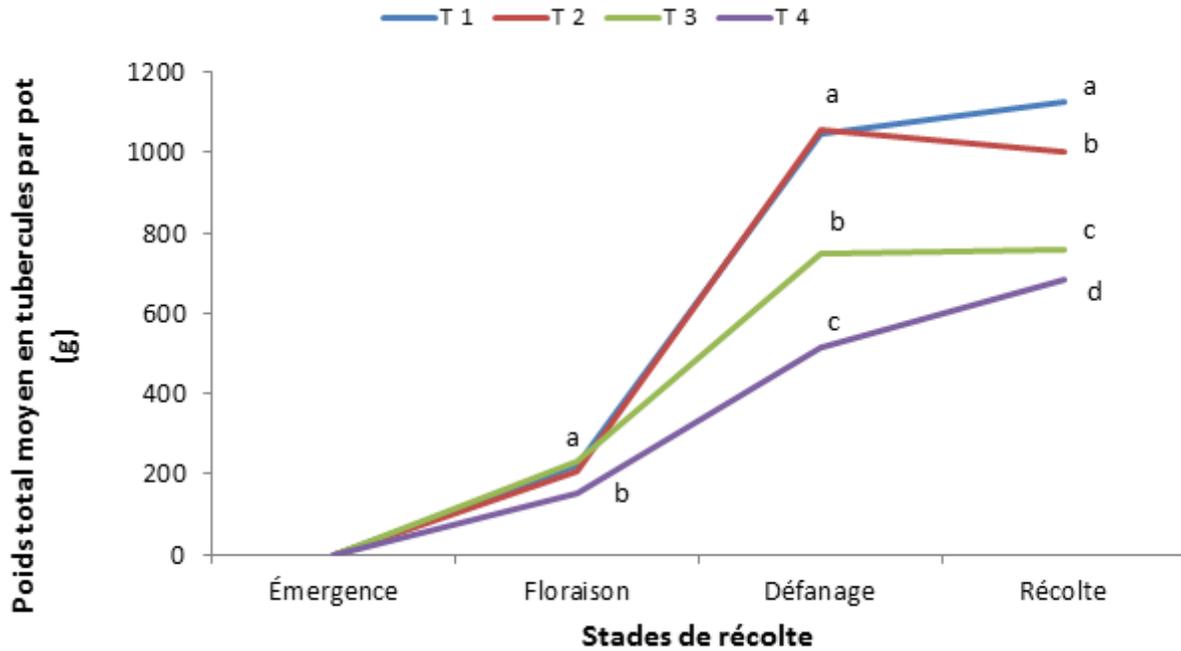
Aucune différence significative sur le poids moyen des tubercules n'a été observée au stade Floraison et ce, même pour le T4 qui subissait un stress hydrique depuis la Plantation. Cette similitude entre le poids moyen observé au stade floraison entre les traitements est attribuable à un nombre de tubercule significativement plus restreint produit à cette même période par le T4, tel que démontré à la Figure 7. Le poids moyen produit par plant a été significativement plus faible pour le T4, T3 au stade Défanage (différences significatives entre T1 et T3, T1 et T4, T2 et T3, T2 et T4 aux seuils respectifs de $P = 0,009$, $0,06$, $0,06$ et $0,04$) et pour le T3 au stade Défanage (différences significatives entre T1 et T3, T2 et T3 et T4 aux seuils respectifs de $P = 0,0023$, $0,0889$ et $0,0182$). Les résultats obtenus par le T3 au stade Récolte indiquent que le stress hydrique survenu entre le stade Floraison et Défanage a influencé, de manière significative, le poids moyen produit par plant au stade Défanage et Récolte. Il est intéressant de souligner qu'il n'y a pas eu de différence significative entre le T4, T1 et T1 au stade Récolte. Toujours, selon le code du BBCH, au stade Floraison, les tubercules du T4 avaient, en théorie, atteint 30 % de leur poids final. De plus, le stress hydrique engendré lors de la période entre l'Émergence et la Floraison avait initié un nombre limité de tubercules lors des premières phases

de la tubérisation (Figure 7). Ces deux conditions expliquent très bien les résultats obtenus par le T4 au stade Récolte qui démontrent qu'un apport en eau adéquat entre la période de Floraison et Défanage permet de produire des tubercules dont le poids moyen s'apparente à un plant ayant reçu une quantité d'eau suffisante.

Le stade phénologique de la floraison agit ainsi comme un moment charnière concernant la production de tubercules. Avant la floraison, un stress hydrique influencera davantage le nombre moyen de tubercules tandis qu'un stress hydrique survenant après la floraison influencera plutôt le poids moyen des tubercules.

Le poids total en tubercules a aussi été recensé par plant à chacun des stades phénologiques de récolte des plants. Des analyses statistiques selon le traitement et la période ont également eu cours. Il y a des différences significatives pour les facteurs Traitement et Période, ainsi que pour l'interaction Traitement x Période au même seuil de $P < 0,0001$ pour chacun des facteurs. La présence d'une interaction significative entre les traitements et les périodes indique que le poids en tubercules par plant, entre les traitements, peut être différent et que cette différence varie d'une période à l'autre.

La Figure 9 présente le poids total moyen en tubercules par plant selon la période (stades phénologiques) pour chacun des quatre traitements. Il est intéressant de constater qu'il existe de nombreuses différences significatives entre les traitements. En effet, les différences significatives entre les traitements sont survenues dès le stade Floraison au seuil de $P = 0,04$ entre le T1 et le T4, à $P = 0,08$ entre le T2 et le T4 et à $P = 0,02$ entre le T3 et le T4. Par la suite, au stade défanage, une différence significative s'est créée entre le T1, T2 et T3 au seuil de $P = 0,0005$, tandis que les différences significatives entre T1, T2 et T4, ainsi que le T3 et le T4, se sont accentuées selon des seuils respectifs de $P < 0,0001$ et $P < 0,0025$. Finalement, le stade Récolte ne fait pas cavalier seul, car les différences entre les traitements ont été statistiquement confirmées, et ce, pour chacun d'entre eux selon des seuils où $P = 0,0105$ entre T1 et T2, $P < 0,0001$ entre T1 et T3, T1 et T4, T1 et T3, T2 et T4, enfin $P = 0,0935$ entre T3 et T4. Fait à noter, le stade Émergence a uniquement été présenté dans cette figure à des fins esthétiques puisqu'aucun tubercule n'a été récolté à ce stade. En effet, à ce stade de développement les plants n'ont pas débuté la formation des tubercules.



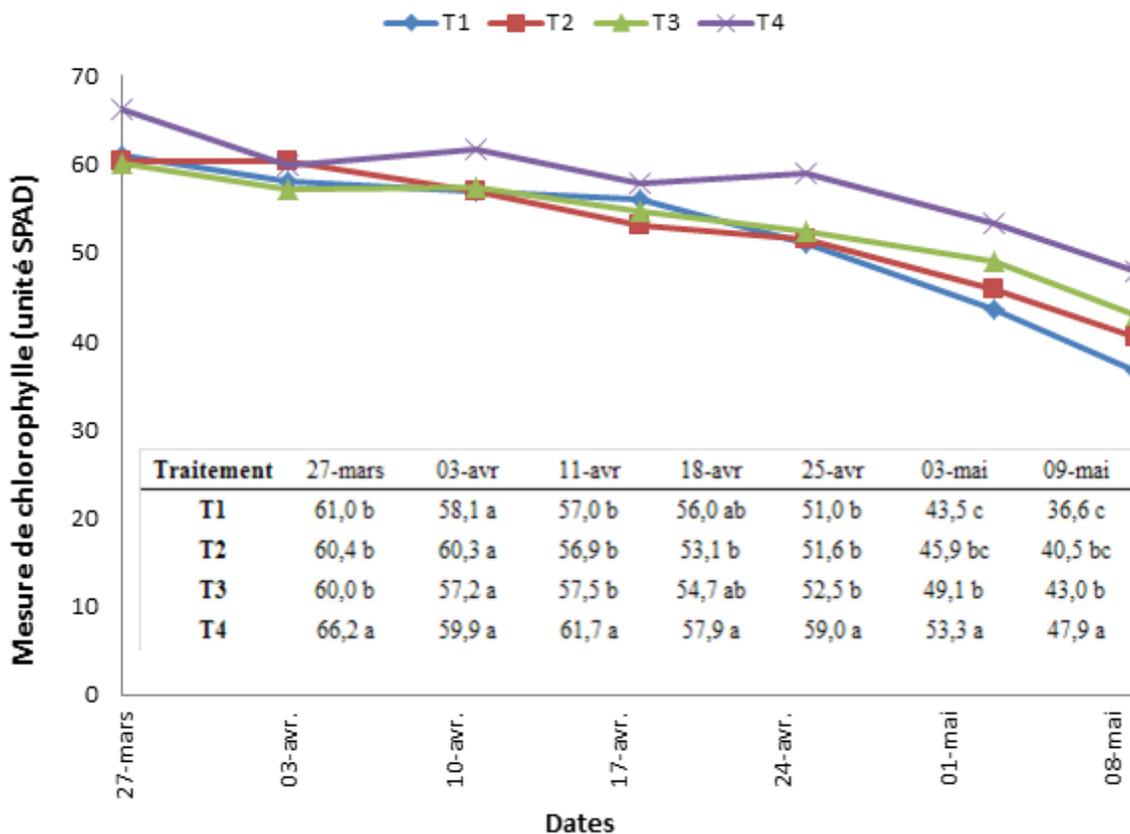
Les lignes ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,05$ à l'exception des traitements 2 et 4 au stade floraison et des traitements 3 et 4 au stade récolte qui sont statistiquement différentes aux seuils respectifs de $P = 0,08$ et $P = 0,09$.

Figure 9. Poids total moyen en tubercules par plant (g) selon le traitement et le stade phénologique.

Le poids total en tubercules par plant, tel que présenté à la Figure 9 est relié au poids moyen des tubercules (Figure 8) et au nombre moyen de ces derniers (Figure 7) toujours par plant. Il est intéressant de constater que les différences significatives surviennent dès le stade Floraison. Ceci suggère que seul le stress hydrique engendré aux plants du T4 entre le stade Émergence et Floraison a entraîné un effet rapide sur la croissance des tubercules, le stress hydrique entre le stade Plantation et Émergence pour les plants du T2 n'ayant pas entraîné de différence significative sur le poids total en tubercules au stade Floraison. Ainsi, entre le stade Plantation et Émergence, il est possible que le planton ait uniquement utilisé ses propres réserves en eau pour assurer son émergence, limitant ainsi la portée du stress hydrique entre ces deux stades sur le rendement en tubercules au stade Floraison. À l'inverse, lorsque le plant est mature, les réserves en eau du sol deviennent la seule réserve en eau que le plant peut utiliser pour assurer ses besoins physiologiques. Autrement, dans les périodes de stress hydrique, le plant commande la fermeture des stomates ce qui diminue l'activité photosynthétique des chloroplastes. La tubérisation étant directement influencée par l'activité photosynthétique des chloroplastes, il est clair que le stress hydrique exercé aux plants du T3 durant la période comprise entre le stade Floraison et Défanage, explique de manière convaincante la différence significative du poids total moyen en tubercules par plant du traitement par rapport aux T1 et T2. Durant ce même stade, le sol du T4 a été bien irrigué, mais cela ne s'est pas traduit par une grande augmentation des rendements. En effet, la comparaison entre les poids totaux moyens des tubercules récoltés au stade Défanage, pour le T4 et T3, démontre que les plants du T3 ont produit près de 749 g de tubercules par plant, tandis que les plants du T4 n'ont produit que 512 g par plant. Tel que démontré précédemment, les rendements plus faibles du T4 au stade Défanage s'expliquent non seulement par un nombre de tubercules plus faible, mais aussi par un poids moyen plus faible. L'effet du stress hydrique à cette période pour les plants du T3 s'est toutefois répercuté dans les rendements observés au stade Récolte puisque ceux-ci ont semblé plafonner. Ce qui n'a pas été le cas avec les plants du T4 qui ont continué le grossissement de leurs tubercules durant ce stade. Durant la même période, la production de tubercules a également profité aux plants du T1 tandis que ceux du T2 ont vu leur production stagner. Il demeure difficile d'expliquer la différence significative entre le T1 et le T2. Pour l'instant, l'hypothèse la plus plausible serait que le potentiel de rendement des plantons utilisés pour le T2, au stade de Récolte, aurait été inférieur au potentiel des plantons du T1.

4.2 Le statut nutritionnel azoté des plants

Pour étudier la variation du statut nutritionnel azoté des plants, l'indice de chlorophylle dans les feuilles a été mesuré du 27 mars au 9 mai par spectrométrie (Figure 10). Sur l'ensemble de cette plage de mesure et pour tous les traitements, l'indice de chlorophylle a eu une tendance générale à la baisse, avec une diminution plus prononcée à partir du 25 avril, soit suivant la floraison. Les analyses statistiques révèlent que le traitement a eu un impact significatif sur la teneur en chlorophylle des feuilles ($P < 0,001$) tout au long de la plage de mesure, en interaction avec les dates (interaction Trait x Date à $P < 0,001$). Ainsi, c'est principalement le T4 qui s'est distingué des autres traitements avec des mesures de la chlorophylle supérieures aux T1, T2 et T3 à toutes les dates, exception faite du 3 avril. En fin de saison, le T3 se différencie également du T1 à partir du 3 mai, puis le T2 se distingue aussi du T1 à partir du 9 mai. Il n'y a donc pas eu de différences significatives entre les traitements T1, T2 et T3 avant le 3 mai, date qui se situe juste avant la période Défanage, même si le T2 avait subi une période de stress hydrique avant l'émergence.



Les valeurs ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P = 0,05$.

Figure 10. Évolution de l'indice de chlorophylle dans les feuilles (unité SPAD) selon le traitement.

La lecture de SPAD semble donc permettre de détecter le stress hydrique des plants T4 dès la 2^e semaine suivant l'émergence, soit rapidement après le début des stress hydriques dans le cas de ce traitement. Par ailleurs, ils restent différents jusqu'à la fin de l'essai, même si une irrigation de type « confort hydrique » leur est fournie entre la floraison et le défanage. Par la suite, cette mesure a aussi permis de distinguer tout d'abord le T3, en date du 3 mai, soit également à partir de la période où les stress hydriques ont débuté. Enfin, en toute fin d'essai, les plants du T2 se sont aussi distingués des plants T1.

À l'opposée, l'analyse conventionnelle de la teneur en N_{total} dans la 4^e feuille mature au stade floraison n'a pas permis de révéler de différence significative ($P = 0,3039$) (Figure 11). Autrement dit, la teneur en N dans la feuille n'a pas été affectée par les différentes périodes de stress hydrique testées.

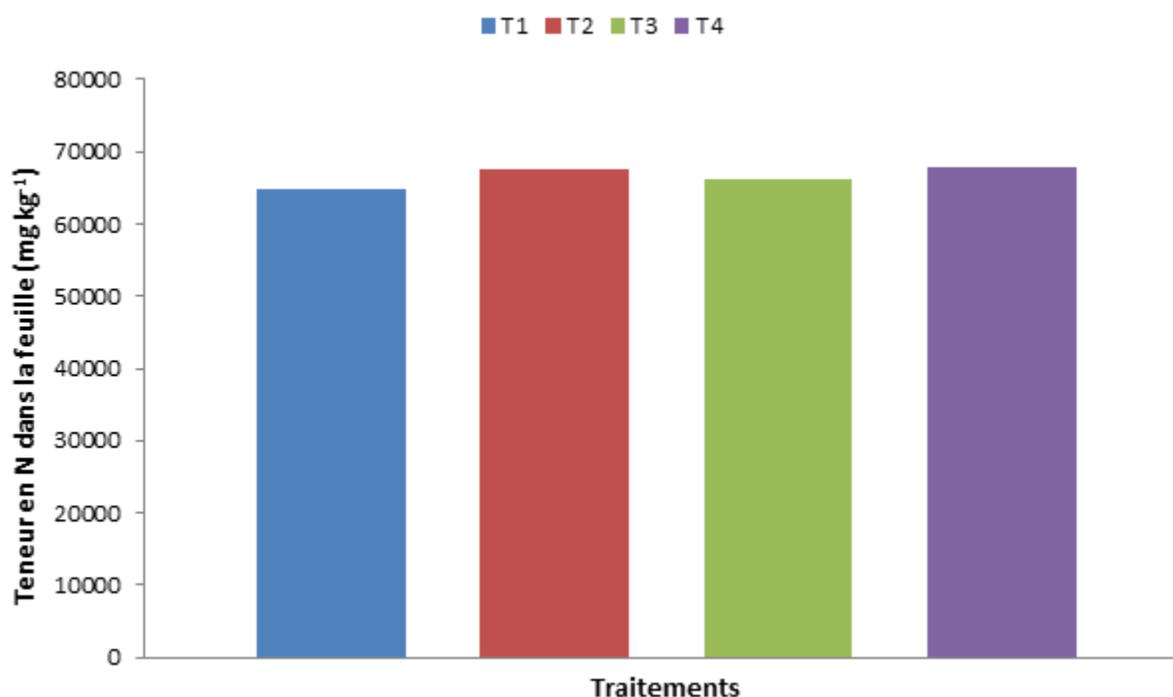
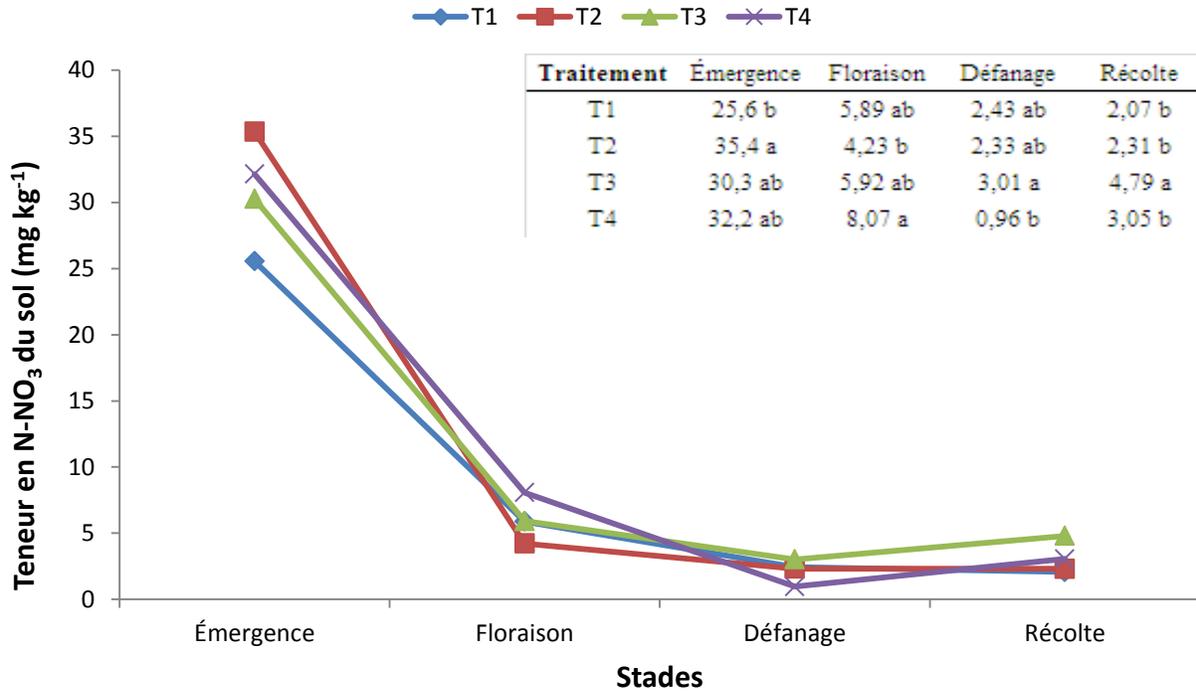


Figure 11. Teneurs foliaire en N (n.s. à $P < 0,05$) au stade floraison.

4.3 La dynamique de l'azote disponible dans le sol

Les analyses de sol ont démontré que les contenus en N-NH₄ n'ont pas été statistiquement influencés par les traitements et ceux-ci étaient toujours beaucoup plus bas (moins de 10 fois) que celles du nitrate. Ainsi, les valeurs de N-NH₄ ne sont pas présentées. À l'opposée, les traitements ont eu un impact très significatif ($P = 0,0418$) sur le contenu en N-NO₃ du sol (Figure 12) différent selon la période (interaction Période x Trait à $P = 0,0003$). De façon générale, les contenus s'abaissent rapidement entre les stades Floraison et Émergence, pour se stabiliser lentement par la suite. Des différences significatives apparaissent dès le stade Émergence. À ce stade, seuls les plants T1 et T3 ont été irrigués. Ce sont aussi ces deux traitements qui semblent présenter la plus faible teneur en N-NO₃ du sol. Toutefois, la différence n'est significative que pour le T1. Par contre, tel qu'il le sera présenté ultérieurement, les prélèvements en N par les fanes, tant du T1 que du T3, sont statistiquement les plus élevés à ce stade, dépassant de 5 fois ceux des autres plants (T2 et T4) (Figure 15). Ainsi, bien que le contenu moindre en N-NO₃ du sol pourrait suggérer que les apports en eau ont fait migrer le N-NO₃ plus en profondeur, il semble plutôt que la baisse du N-NO₃ dans le sol de ces plants soit due à un prélèvement plus intensif de celui-ci à ce stade. D'ailleurs, au stade Floraison, les irrigations du T2 ont débuté et son contenu en N-NO₃ s'abaisse également pour aller rejoindre celui des T1 et T3. Le contenu en N-NO₃ du T2 devient ainsi statistiquement inférieur à celui du T4 qui n'est toujours pas irrigué. Il sera d'ailleurs vu plus loin qu'à ce stade, les plants du T4 sont aussi ceux présentant statistiquement les plus faibles prélèvements globaux en N (Figure 18) par rapport aux trois autres traitements. Au final, lors de la Récolte, c'est le T3 qui présente le plus haut contenu en nitrate résiduel par rapport à tous les autres traitements (à $P < 0,006$) et c'est aussi le seul qui n'était pas irrigué depuis la Floraison, les trois autres traitements ayant tous été irrigués entre la floraison et le défanage. Le contenu en N-NO₃ y est de 1,5 à 2,3 fois plus élevé que dans les autres traitements qui eux ne présentent pas de différence significative entre eux.



Les valeurs ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P = 0,07$.

Figure 12. Évolution de la quantité de N-NO₃ du sol (mg kg⁻¹ b.s.) selon le stade phénologique et le traitement.

À l'image des mesures ponctuelles de N du sol, les flux de N-NH₄ des MEI ne présentent pas de différence significative en fonction des traitements. De plus, leurs valeurs équivalent à moins de 1% de celles du N-NO₃. Ainsi, seul les flux de N-NO₃ sont rapportés à la Figure 13. Toutefois, bien que la Période est un effet significatif ($P = 0,007$), les différents traitements ne présentent pas de différence significative entre eux au seuil de $P < 0,10$ pour une date donnée. L'effet Traitement est cependant à $P = 0,13$ avec une interaction Période x Traitement à $P = 0,07$. Les traitements T1 et T3, les seuls irrigués dès la plantation, tendaient ainsi toutefois à se distancer des traitements T2 et T4, suggérant que le maintien d'un certain taux d'humidité dans le sol faisait en sorte que davantage de N-NO₃ migraient vers les MEI, à l'image de ce qui peut se passer entre le N-NO₃ et les racines des plants. C'est en effet le mouvement de l'eau qui permet au nitrate d'atteindre les racines au travers du sol, car le mouvement du nitrate s'y fait par transport convectif ou *mass flow*. D'ailleurs, nous verrons ultérieurement qu'à ce stade, les fanes et les racines des plants T1 et T3 étaient aussi ceux présentant les prélèvements en N les plus élevés, indiquant que leur accès au N disponible était plus grand ou facilité.

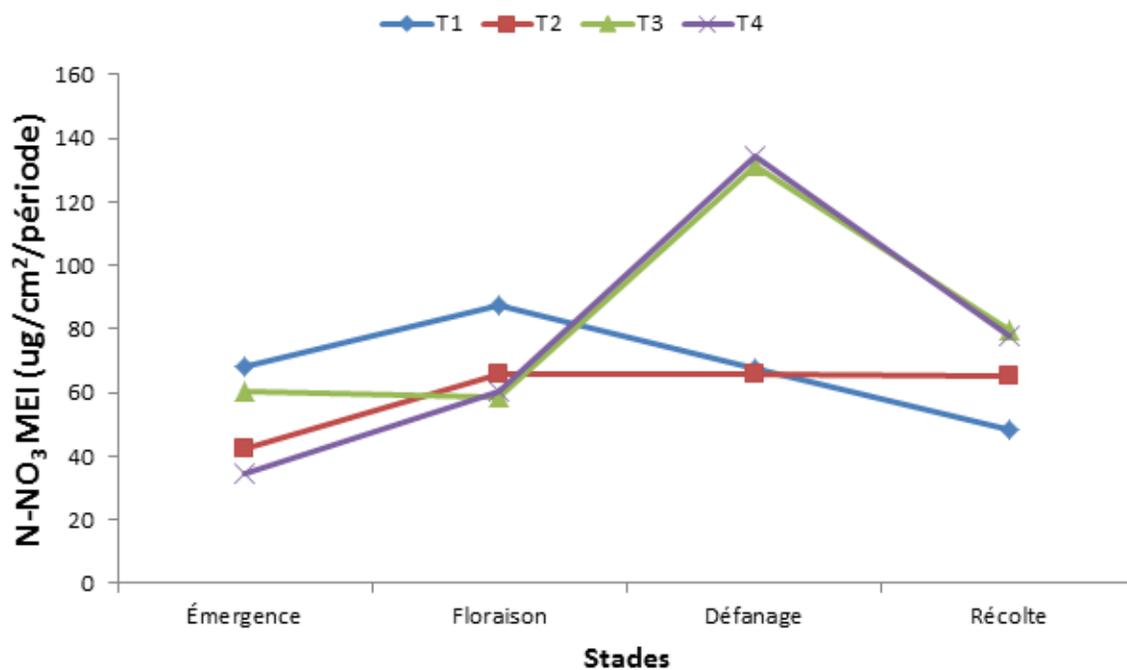


Figure 13. Évolution des teneurs en N-NO₃ (ug/cm²/période) mesurées par les membranes à échanges ioniques (MEI) selon le stade phénologique et le traitement (tous n.s. à $P < 0,1$).

4.4 L'efficacité de l'utilisation de l'eau

D'un point de vue environnemental, il est possible de comparer les traitements entre eux selon leur efficacité à produire une quantité de tubercules pour un volume d'eau appliqué (Figure 14). Ces résultats n'ont pas fait l'objet d'une analyse statistique et représentent des moyennes selon les stades de récolte. Les stress hydriques que les plants du T4 ont subis ont négativement influencé la production en tubercules par litre d'eau du moins au stade Défanage et Récolte.

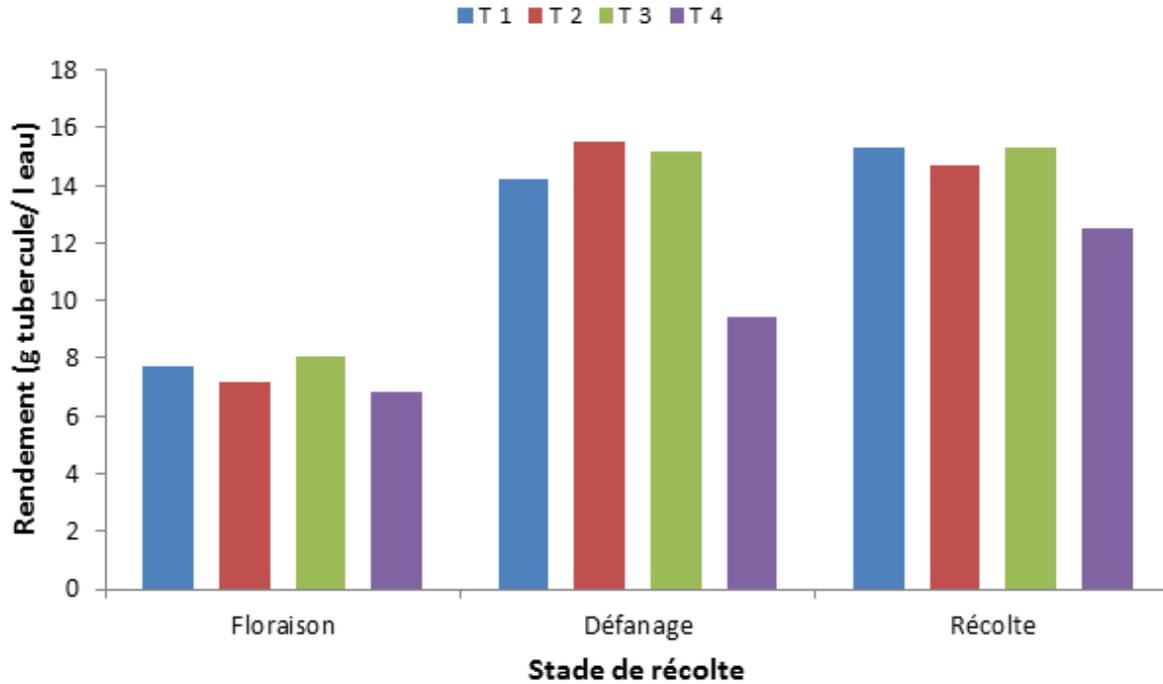
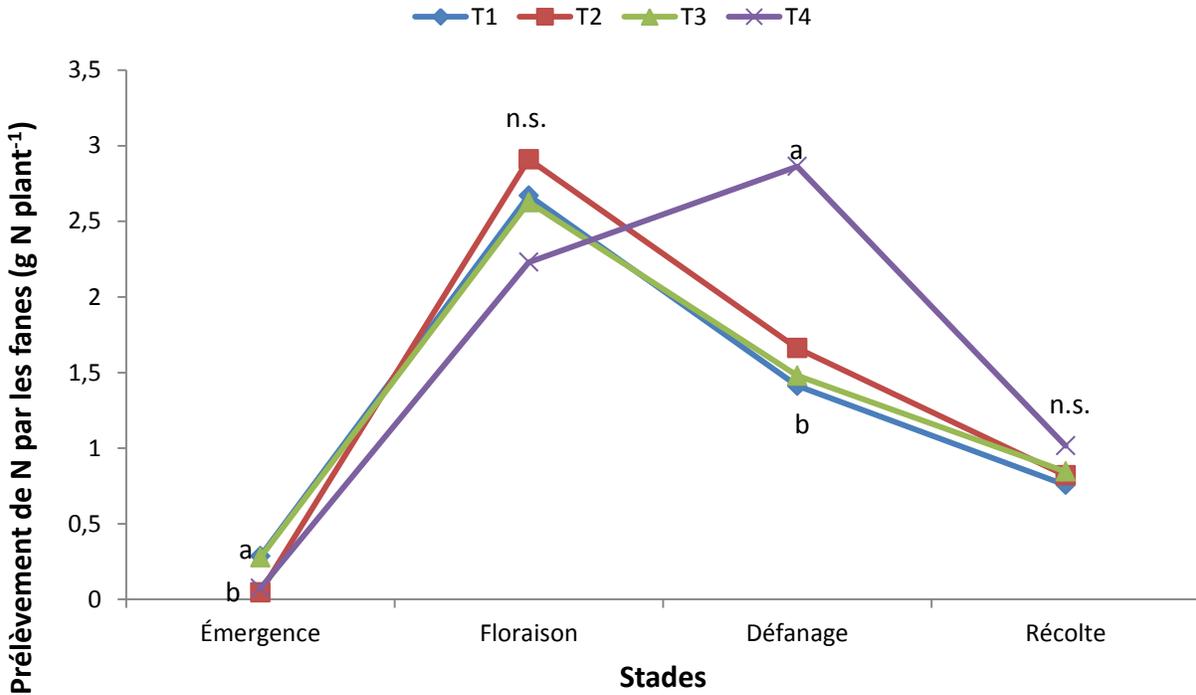


Figure 14. Efficacité de l'utilisation de l'eau par les plants (g/l).

4.5 Utilisation de l'azote

Pour évaluer l'impact des périodes de stress hydrique sur la nutrition en N de la culture, les prélèvements en N des racines, des fanes (parties aériennes du plant) et des tubercules ont été mesurés séparément à chaque stade et aussi analysés au total. L'effet des traitements a été le plus significatif pour les prélèvements en N des tubercules ($P < 0,0001$), des racines ($P = 0,0166$), puis des fanes ($P = 0,0486$). Dans tous les cas, la période a aussi eu un impact significatif à $P < 0,03$ et pour tous les paramètres, l'interaction Période x Traitement est significative à au moins $P < 0,03$.

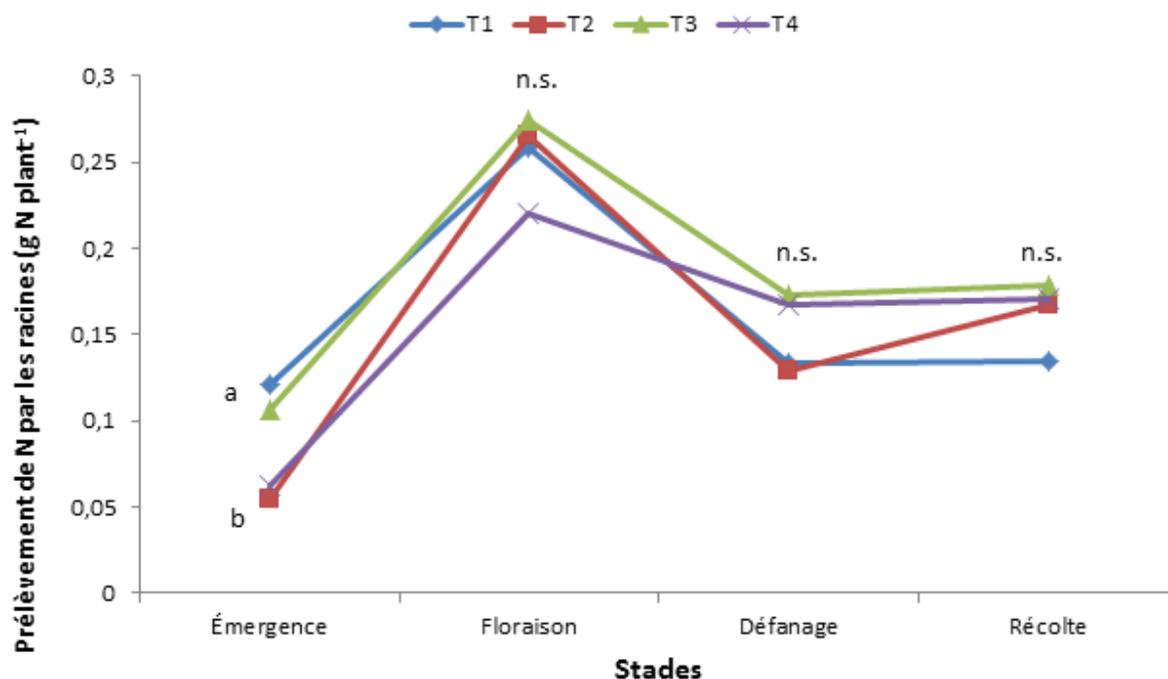
Sur la durée de l'essai, le prélèvement en N par les fanes (Figure 15) a été maximal au stade Floraison, excepté pour le T4 dont les prélèvements ont été retardés par la longue période de stress hydrique allant de la plantation à la floraison. Dès le stade Émergence, la présence de stress hydrique a d'ailleurs eu un impact notable sur les prélèvements en N par les fanes. Ainsi, les deux traitements irrigués, T1 et T3, montrent des prélèvements 5 fois supérieurs à ceux des traitements non irrigués, T2 et T4. À la floraison, suivant l'apport fractionné de N, seuls les prélèvements du T4, seul traitement n'ayant toujours pas été irrigué, tendent à être inférieurs à ceux des autres traitements, mais la différence n'est pas significative au seuil $P < 0,1$. Par contre, au stade Défanage, les plants du T4, irrigués suivant le stade Floraison, se rattrapent fortement. Ainsi, leurs prélèvements en N atteignent les valeurs mesurées un stade plus tôt chez les trois autres traitements qui eux avaient été irrigués avant la floraison. Au final, les contenus en N des plants déclinent suivant leur défanage et tous les traitements présentent des valeurs similaires. Lors de ce déclin, le N entreposé dans les fanes est alors transloqué vers les tubercules.



Les valeurs ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P = 0,004$.

Figure 15. Évolution du prélèvement de Ntotal par les fanes (g N plant⁻¹) selon le stade phénologique et le traitement.

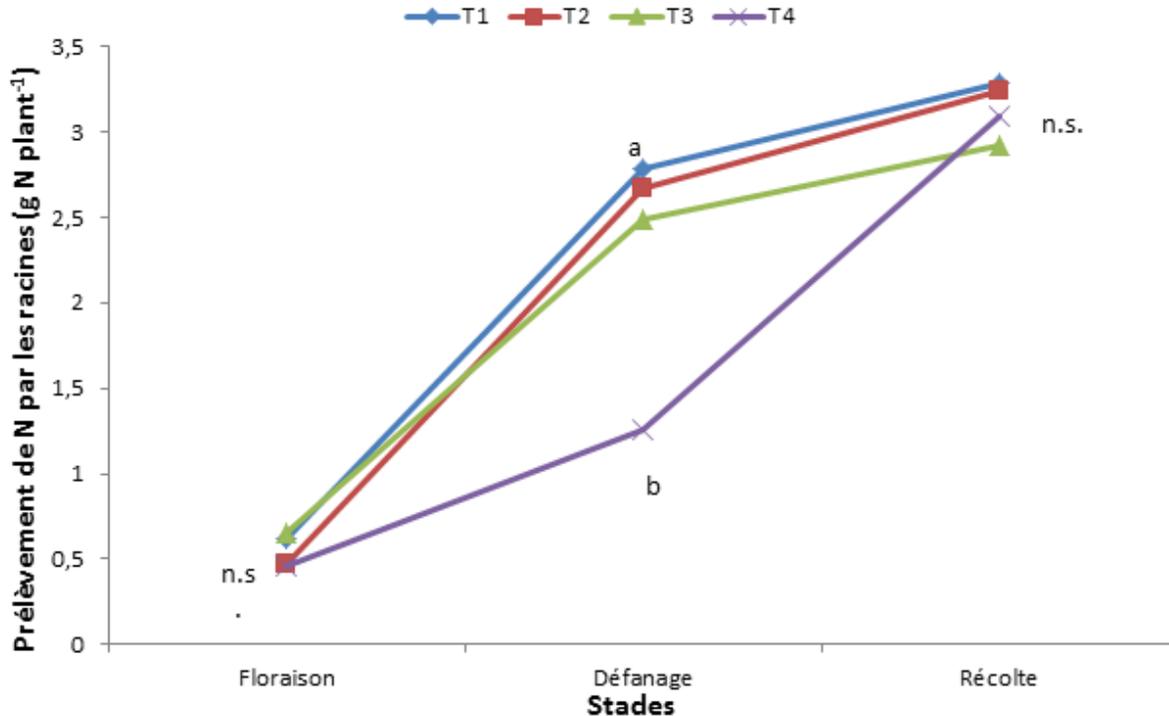
Dans le cas du prélèvement en N par les racines, l'impact du stress hydrique se révèle aussi rapidement, mais ne perdure pas dans le temps puisque les seules différences significatives en fonction des traitements pour un stade donné ont été mesurées au stade Émergence (Figure 16). L'impact du stress hydrique y est le même que pour le prélèvement en N des fanes. Ainsi, les racines des plants T1 et T3, les seuls irrigués en date du stade Émergence, présentent des contenus racinaires en N deux fois plus élevés que ceux des traitements T2 et T4. Le pic de prélèvement du N par les racines est également survenu au stade Floraison, mais dans le cas des racines le T4 ne fait pas exception. L'impact du stress hydrique sur le prélèvement en N a donc été plus marqué au niveau des fanes que des racines.



Les valeurs ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P = 0,05$, excepté entre T3 et T4 au stade émergence où $P = 0,12$.

Figure 16. Évolution du prélèvement de N_{total} par les racines (g N plant^{-1}) selon le stade phénologique et le traitement.

Au niveau du prélèvement en N par les tubercules (Figure 17), l'impact du stress hydrique ressort également, mais de façon décalée dans le temps par rapport aux fanes et aux racines. Cet impact est marqué, mais transitoire, tout comme pour les parties aériennes. Ainsi, tout comme dans le cas des fanes, le T4 se distingue des autres traitements au stade Défanage, mais au final les valeurs de prélèvements en N sont les mêmes pour toutes les parties de la plante. Le plus haut prélèvement en N des fanes du T4 au stade Défanage semble donc avoir permis aux tubercules, présentant alors un prélèvement en N 2 fois moindre que celui des autres traitements, de combler leur retard et de présenter, au final, lors de la récolte, des valeurs similaires aux autres traitements.

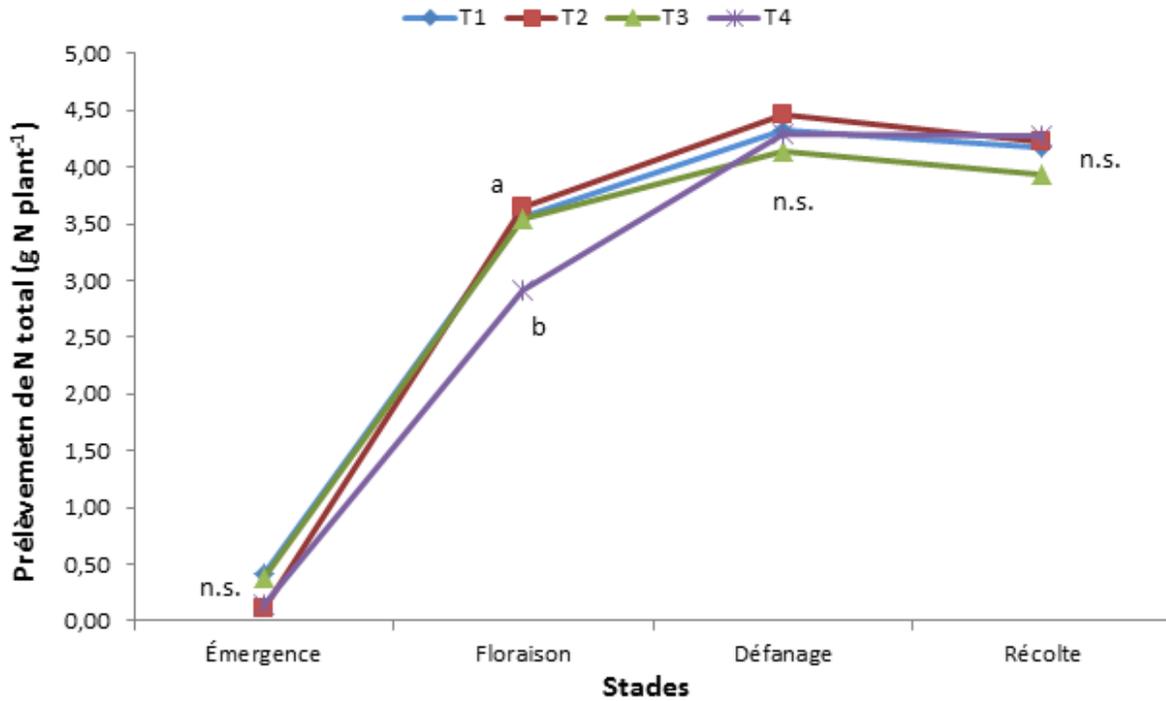


Les valeurs ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,001$.

Figure 17. Évolution du prélèvement de N_{total} par les tubercules (g N plant^{-1}) selon le stade phénologique et le traitement.

Si les prélèvements globaux en N, additionnant ceux des fanes, des racines et des tubercules, sont analysés (Figure 18), il ressort que l'absence d'irrigation « confort hydrique » pour les plants du T4 jusqu'au stade Floraison a causé un retard de prélèvement en N par les plants ($P < 0,005$) et que ce retard n'a pu être comblé qu'à partir du moment où les plants ont commencé à être irrigués. Par contre, ces plants ont pu par la suite combler à 100 % leur retard nutritionnel ce qui indique qu'un manque de prélèvement de N par la culture peut se rattraper si le N est toujours disponible dans le sol. Toutefois, ce rattrapage nutritionnel n'a pas permis aux plants T4 de combler leur retard de production en tubercules et au final, tel que rapporté précédemment, leur rendement est significativement le moins élevé de tous. Par ailleurs, les plants T2 et T3 ne présentent pas de différences globales significatives comparativement aux plants T1, pour lesquels les besoins en eau étaient comblés sur toute la durée de l'essai. L'absence d'irrigation « confort hydrique » durant un seul stade, soit de la plantation à l'émergence (T2) ou de la floraison au défanage (T3), ne provoque ainsi pas de différence au niveau du N prélevé au total sur la durée de l'essai. Par contre, elle se reflète au niveau des rendements puisque les plants T2 et T3 ont produit tous les deux des rendements inférieurs à celui des plants T1 qui n'ont pas subi de déficit hydrique.

Par rapport à la dose de N apporté par l'application de l'engrais minéral, dans tous les cas les plants ont réussi à en prélever davantage, soit 1,2 fois la dose apportée lors de la mesure globale à la fin de l'essai pour tous les traitements sans différence significative. À l'image de ce qui se produit au champ, le sol a donc fourni une partie importante du N, rappelant les avantages de maintenir le sol en bonne santé.



Les valeurs ne portant pas la même lettre sont statistiquement différentes au seuil de $P < 0,005$.

Figure 18. Évolution du prélèvement global (fanés + racines + tubercules) de Ntotal (g N plant⁻¹) par le plant selon le stade phénologique et le traitement.

5 CONCLUSION

Les plants du traitement témoin (T1) ont produit les rendements les plus élevés, alors que la 2^e position revient aux plants du T2, qui ont pu subir un stress hydrique jusqu'à l'émergence. Des baisses importantes de rendements ont été observées avec le T3, dont le statut hydrique du sol est devenu limitatif alors que les plants étaient à leur plein développement. La baisse de rendement s'explique par un poids moyen des tubercules plus faible. Enfin, les plants du T4, qui ont réalisé l'essentiel de leur développement en situation favorable aux stress hydriques, ont produit un nombre de tubercules plus faibles. Donc, un stress hydrique aura un impact sur le poids moyen des tubercules s'il survient à un stade avancé du développement et aura un impact sur le nombre de tubercules s'il survient au début du développement. Ces observations sont, entre autres, appuyées par l'évolution temporelle du prélèvement global (fanés, racines et tubercules) de N_{tot} . Le T4 a accusé un retard marqué à ce niveau jusqu'au moment où les conditions hydriques sont devenues favorables, mais le rattrapage est survenu trop tard. Ces résultats suggèrent qu'il serait préférable, dans un contexte où la culture est irriguée et où les ressources le permettent, que le statut hydrique du sol soit maintenu dans des conditions favorables tout au long du développement de la culture. Toutefois, si les réserves en eau ou la capacité des équipements sont des facteurs limitatifs, il faudra gérer le risque. À choisir, entre une stratégie qui peut amener à un nombre de tubercules plus faible ou à un poids moyen par tubercules plus bas.

6 RÉFÉRENCES

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 n° 6163).

Boivin, C., C. Landry et J. Caron. 2008. *Étude d'acquisition de connaissances sur la détermination de l'existence de patrons éventuels d'assèchement ou d'humidité dans un sol agricole en relation avec le rendement en pommes de terre et la perte de nitrates*. Rapport final remis au Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec. IRDA. 47 p. (CDAQ n° 5218).

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 (n° 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.

Le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2010. Guide de référence en fertilisation du Québec. 2^e édition. Québec, Québec. 473 p.

Conseil pour le développement de l'agriculture au Québec (CDAQ), non daté. *Aménagement d'un réseau souterrain à Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier*, Fiche d'un projet réalisé dans le volet 2 du Programme d'approvisionnement en eau Canada-Québec (PAECQ), 1 p., [En ligne, consulté le 2 décembre 2013] http://www.cdaq.qc.ca/content/Documents/Fiches-PAECQ_V2.pdf

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

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

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. Ministère ENV/2003/0233. 23 pp.

Hopkins, W.G. 1995. *Physiologie végétale*, traduit de *Introduction to plant physiology*, 2^e édition, aux éditions de boeck, Bruxelles, Belgique [En ligne, consulté le 10 janvier 2014] <http://books.google.ca/books?id=V80eVIHUCoC&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false> 515p.

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

Luquet, D., Begue, A., Vidal, A., Clouvel, P., Dauzat, J., Oliosio, A., Gu, X. F., and Tao, Y. 2003. Using multidirectional thermography to characterize water status of cotton. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 84, No. 3, pp. 411-421.

Meier, U. 2001. *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants, BBCH Monograph*, Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, 158 p.

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 2007. *Monographie de l'industrie de la pomme de terre*. 85 p. [En ligne, consulté le 3 décembre 2013] [http://www.caaq.gouv.qc.ca/userfiles/File/DOC%20REFERENCE/Monographiepommedeterre\[1\].pdf](http://www.caaq.gouv.qc.ca/userfiles/File/DOC%20REFERENCE/Monographiepommedeterre[1].pdf)

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

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

Statistiques Canada. 2010. *Superficie, production et valeur à la ferme des pommes de terre (mesures métriques), Canada et provinces* [En ligne, consulté le 29 octobre 2010], <http://www.statcan.gc.ca/pub/22-008-x/22-008-x2010002-fra.pdf>

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

Vallée, J., C. Boivin, D. Bergeron, R. Audet et F. Chrétien. 2014. *Comparaison et évaluation d'outils de gestion de l'irrigation*. Rapport final, 74 p.

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

7 ANNEXE

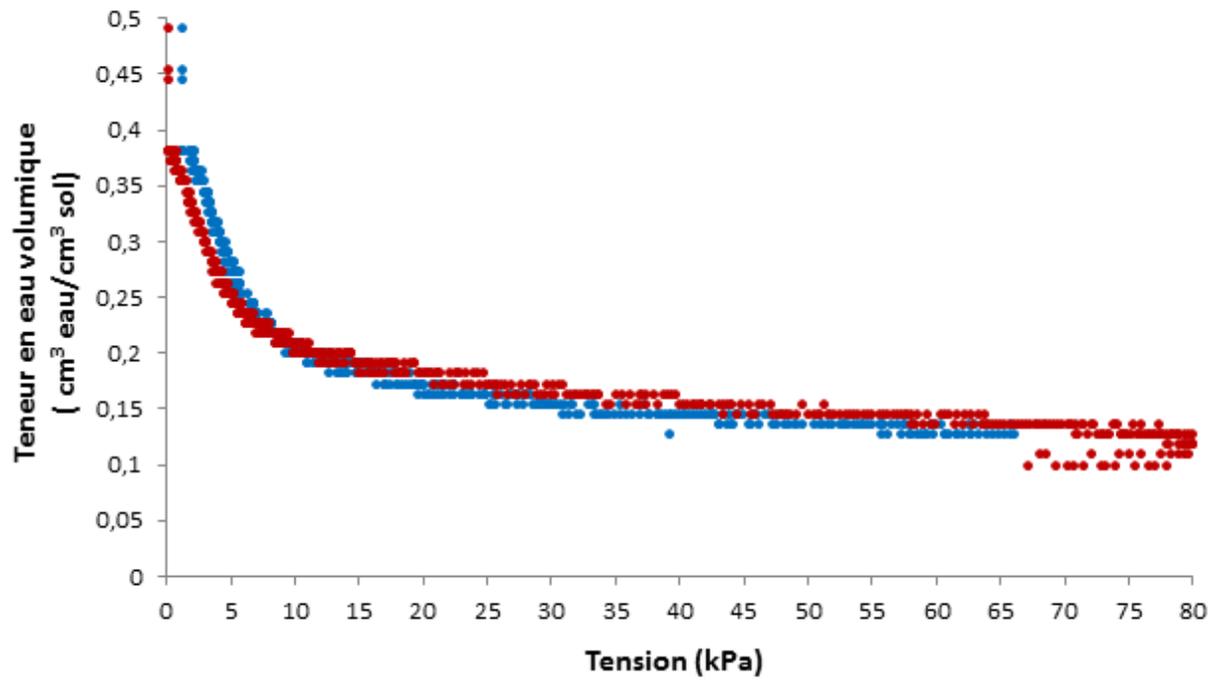


Figure 19. Courbe de désorption en eau du sol « pratique ».

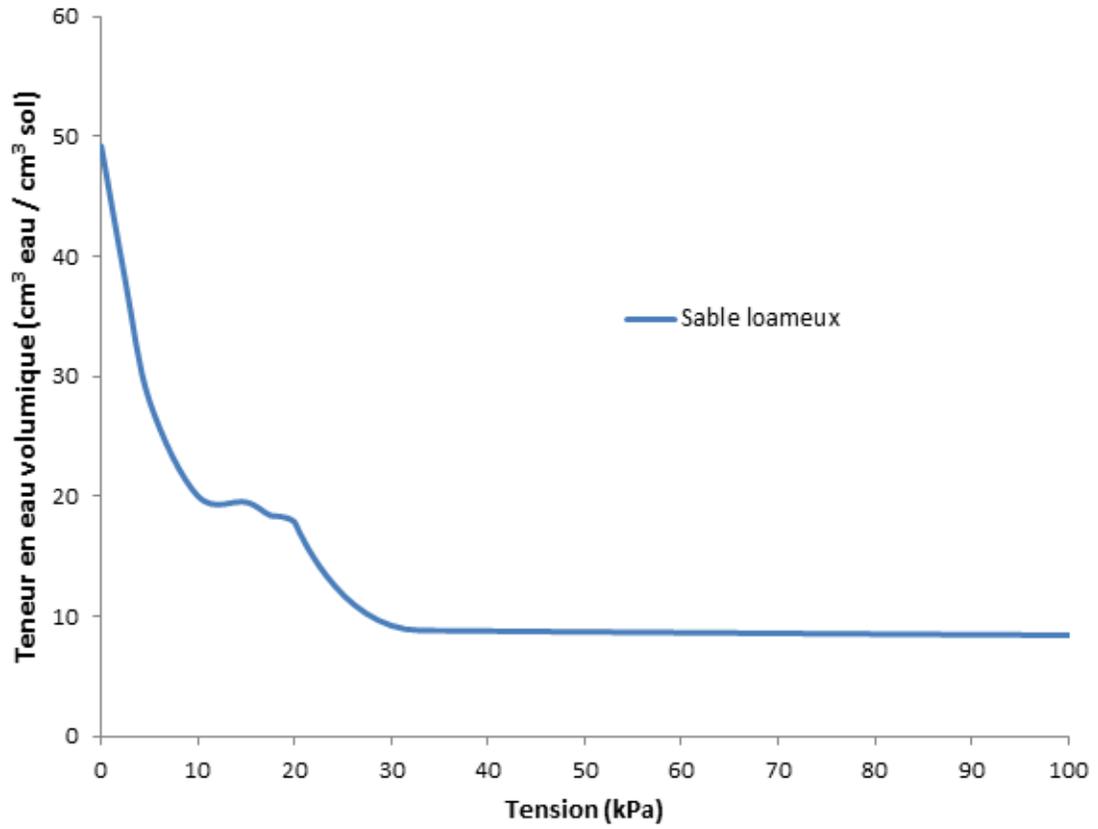


Figure 20 Courbe de désorption en eau du sol réalisée en laboratoire selon Topp et coll. (1993).

8 PHOTOGRAPHIES



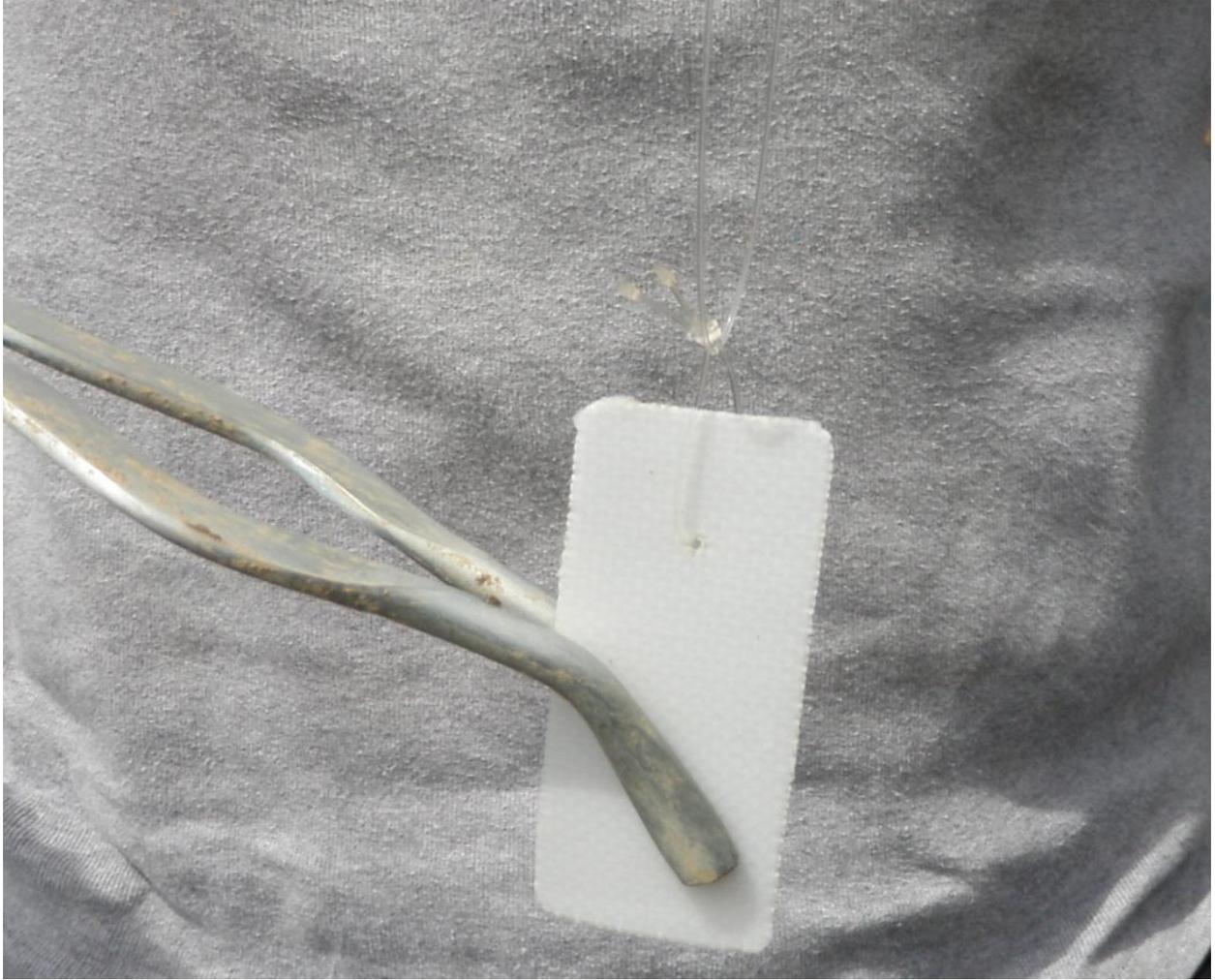
Photographie 1 Serre expérimentale au complexe scientifique du Québec.



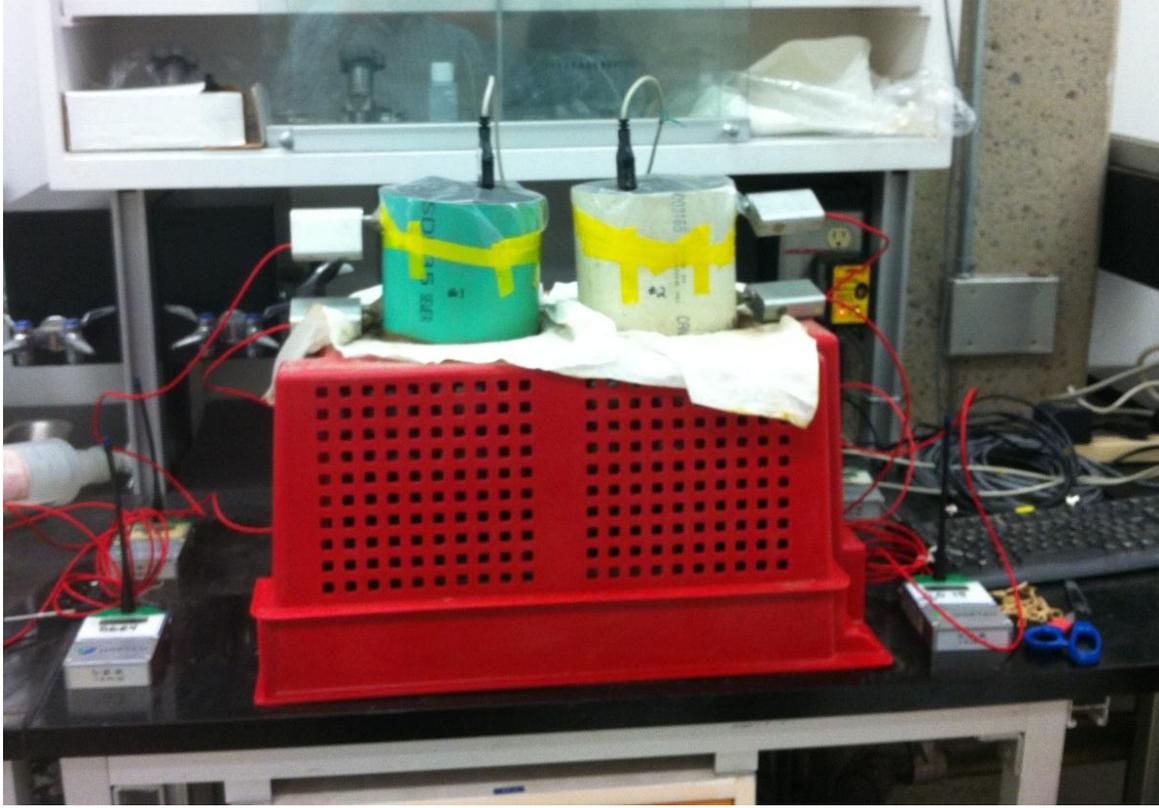
Photographie 2 Prélèvement du sol destiné aux pots à l'automne 2012, Deschambault.



Photographie 3 Tables sur mesure en bois pour la disposition des pots dans la serre.



Photographie 4. Membrane d'échange ionique (MEI).



Photographie 5. Dispositif pour la réalisation de la courbe de désorption « pratique ».



Photographie 6. Installation des sondes TDR



Photographie 7. Nettoyage des tubercules



Photographie 8. Classement visuel des tubercules par poids



Photographie 9. Montage de l'échantillon à l'intérieur de la chambre à pression.