

## RAPPORT FINAL IA 216677

# DÉVELOPPEMENT D'UNE FERTILISATION AZOTÉE MIXTE COMBINANT UNE PART D'ENGRAIS CONVENTIONNEL ET UNE PART D'ENGRAIS À LIBÉRATION CONTRÔLÉE PERMETTANT DE CONTRER LE LESSIVAGE ET DE STABILISER LES RENDEMENTS ANNUELS EN POMMES DE TERRE



**Auteur et responsable scientifique : CHRISTINE LANDRY, AGR., BIOLOGISTE, PH. D**

Co-auteurs : M. Marchand-Roy, J. Mainguy, L. Belzile

Collaborateurs : C. Boivin, J. Vallée, A. Lamontagne, M. Grenier, Mélissa Paradis, Denise Godonou

Rapport présenté à : Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, Cultivons l'avenir2, AAC-MAPAQ

Date : 28 janvier 2020

Projet IRDA # : 901186

L'IRDA a été constitué 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 de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations (MEIE).

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui travaille à chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

#### **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.

#### **Notre vision**

En 2016, l'IRDA est reconnu à l'échelle canadienne comme un chef de file en recherche, développement et transfert en agroenvironnement. L'IRDA se démarque par son approche intégrée et par le dynamisme de ses partenariats qui lui permettent d'anticiper les problèmes et de proposer des solutions novatrices répondant aux besoins des agriculteurs et de la société.

#### **Pour en savoir plus**

[www.irda.qc.ca](http://www.irda.qc.ca)

## **PARTENAIRES**

**Agriculture, Pêcheries  
et Alimentation**

**Québec** 

**Cultivons l'avenir 2**  
Une initiative fédérale-provinciale-territoriale

 Agriculture et  
Agroalimentaire Canada Agriculture and  
Agri-Food Canada

**Canada** 

**Développement d'une fertilisation azotée mixte combinant une part d'engrais conventionnel et une part d'engrais à libération contrôlée permettant de contrer le lessivage et de stabiliser les rendements annuels en pommes de terre.**

Rapport final 2020

Présenté à :

**Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation**

*Programme Innov'Action agroalimentaire, un programme issu de l'accord Cultivons l'avenir 2, conclu entre le ministre de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et Agriculture et Agroalimentaire Canada.*

Préparé par :

---

Christine Landry, agr., biol., Ph.D  
Chercheure IRDA

---

Mylène Marchand-Roy, agr., M.Sc.  
Professionnelle de recherche, IRDA

---

Julie Mainguy, agr. B. Sc.  
Professionnelle de recherche, IRDA

---

Luc Belzile, M.Sc  
Économiste, IRDA

---

## **LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :**

Landry, C. et coll. 2020. Développement d'une fertilisation azotée mixte combinant une part d'engrais conventionnel et une part d'engrais à libération contrôlée permettant de contrer le lessivage et de stabiliser les rendements annuels en pommes de terre. IRDA. 40 pages.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

## ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Christine Landry, Ph. D., IRDA
- Mylène Marchand-Roy, M. Sc., IRDA
- Julie Mainguy, B.Sc., IRDA
- Mélissa Paradis, M. Sc, IRDA
- Félix Lavoie-Lochet, technicien, IRDA

## ÉQUIPE DE RÉDACTION DU RAPPORT

- Chercheure principale, Christine Landry, Ph. D., IRDA
- Mylène Marchand-Roy, M. Sc., IRDA
- Julie Mainguy, B.Sc., IRDA
- Michèle Grenier, biostatisticienne, IRDA
- Luc Belzile, agroéconomiste, IRDA

## COLLABORATEURS

- Carl Boivin, chercheur, IRDA
- Jérémie Vallée, B. Sc., IRDA
- Antoine Lamontagne, technicien agricole, IRDA
- Denise Godonou, M. Sc., IRDA
- Stéphane Perreault / Christine Bourbonnais, conseillers spécialisés, COOP
- Mélissa Gagnon, agronome, MAPAQ - DRMLL

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, poste 640

Courriel : [christine.landry@irda.qc.ca](mailto:christine.landry@irda.qc.ca)

## REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme Innov'Action, un programme issu de l'accord Cultivons l'avenir 2 conclu entre le ministre de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les auteurs remercient également les nombreuses autres personnes qui ont contribué au succès du projet; technicien agricole, ouvriers des fermes expérimentales de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon et Deschambault, personnel technique des différents laboratoires d'analyse de l'IRDA, ainsi que les étudiants d'été.

## TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction.....	1
1.1	Objectifs.....	2
2	Matériel et méthode .....	4
2.1	Mise en place de l'expérience .....	4
2.2	Traitements comparés.....	7
2.3	Dispositif expérimental et analyses statistiques .....	8
2.4	Collecte des données et analyses.....	11
2.4.1	Analyses physiques et chimiques de sol.....	11
2.4.2	Développement, nutrition et rendement de la pomme de terre .....	13
2.4.3	Calcul du taux d'utilisation apparent de l'azote (TUN) .....	14
2.5	Analyse économique .....	14
3	Résultats et discussion .....	16
3.1	Conditions climatiques et disponibilité en eau .....	16
3.2	Développement et nutrition des plants .....	18
3.3	Contenu en N disponible du sol en saison .....	21
3.4	Rendements.....	24
3.5	Utilisation de l'azote par la culture .....	26
3.6	Contenu du sol en azote minéral résiduel post-récolte .....	27
3.7	Analyse économique .....	30
	Conclusion .....	32
	Références.....	33
	Annexe A.....	36

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Caractéristiques physico-chimiques du sol au site d'étude, 2017 et 2018 .....	5
Tableau 2.	Calendrier des principales opérations culturales dans le dispositif expérimental en 2017 et 2018.....	5
Tableau 3.	Paramètres analysés selon les périodes de développement de la culture et le nombre de jours après plantation (JAP), à chaque année.....	12
Tableau 4.	Prix unitaire de l'azote des engrais.....	15

Tableau 5. Irrigations effectuées dans le dispositif expérimental lors des saisons 2017 et 2018 selon les différentes périodes de prises d'échantillons. ....	18
Tableau 6. Prélèvements totaux en N (plants et tubercules) et taux d'utilisation apparent du N (TUN) selon les différentes régies de fertilisation en 2017 et 2018. ....	27
Tableau 7. Potentiel de fourniture en N-NO <sub>3</sub> du sol, mesuré par incubation, suivant la récolte des pommes de terre, le 5 octobre 2017 et 9 octobre 2018. ....	29
Tableau 9. Répartition du coût total de fertilisation selon le type d'engrais. ....	31
Tableau 10. Répartition du coût total de fertilisation selon le type d'engrais. ....	31
Tableau 11. Classement des différentes régies de fertilisation selon le rendement vendable obtenu. ....	31

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Essai au champ, projet IA216677, Deschambault, 11 juillet 2018. ....	4
Figure 2. Plantation des tubercules dans le sillon suivant l'application manuelle des engrais, Deschambault, 25 mai 2017. ....	6
Figure 3. Appareil TX3 d'Hortau muni de trois sorties permettant de suivre en continu le statut hydrique du sol et la température à deux profondeurs (gauche) et gicleurs pour irrigation par aspersion (droite). ....	7
Figure 4. Dispositif expérimental utilisé pour les essais, Deschambault, 2017-2018. ....	9
Figure 5. Plan d'échantillonnage établi pour la prise des divers échantillonnages en saison, 2017-2018. ....	10
Figure 6. Données climatiques au site d'essai pour la saison de croissance 2017. ....	17
Figure 7. Données climatiques au site d'essai pour la saison de croissance 2018. ....	17
Figure 8. Évolution de la masse des plants en 2017 en cours de saison (périodes 1 à 6). ....	19
Figure 9. Évolution de la masse des plants en 2018 en cours de saison (périodes 1 à 6). ....	19
Figure 10. Évolution de la masse totale produite en tubercule en 2017 en cours de saison (périodes 3 à 5 et récolte finale). ....	20
Figure 11. Évolution de la masse totale produite en tubercule en 2018 en cours de saison (périodes 3 à 5 et récolte finale). ....	20
Figure 12. Contenu du sol (0-30 cm) en N-NO <sub>3</sub> , au stade post-émergence, pré-fractionnement et 60 % des prélèvements en N estimés, en 2017. ....	22
Figure 13. Contenu du sol (0-30 cm) en N-NO <sub>3</sub> , au stade post-émergence, pré-fractionnement et 60 % des prélèvements en N estimés, en 2018. ....	23
Figure 14. Rendement total en tubercules frais selon la régie de fertilisation en 2017 et 2018. ....	25
Figure 15. Rendement vendable en tubercules frais selon la régie de fertilisation en 2017 et 2018. ....	25

Figure 16. Contenus en nitrate résiduel de la strate 0-30 cm de sol suivant la récolte des pommes de terre, le 5 octobre 2017 et le 9 octobre 2018.....	28
Figure 17. Contenus en nitrate résiduel de la strate 30-60 cm de sol suivant la récolte des pommes de terre, le 5 octobre 2017 et le 9 octobre 2018.....	29
Figure 18. Coût de chaque régie de fertilisation basé sur le prix moyen 2016-2018 des engrais .....	30

# 1 INTRODUCTION

---

Le haut taux de lessivage du nitrate ( $\text{NO}_3$ ) dans la culture de la pomme de terre (Pdt) est reconnu. La Pdt est cultivée en sols légers et très drainants et elle possède un système racinaire peu développé et inefficace pour prélever les nutriments du sol. De plus, l'azote (N) ne se fixe pas aux particules de sol et est facilement emporté par le mouvement de l'eau. Sous les conditions de sol et de climat du Québec, des taux d'utilisation du N (TUN) faibles sont donc la norme. De 60 % au mieux, le taux d'utilisation y est en moyenne de 45 % et peut s'abaisser dans les 30 % lors de mauvaises saisons climatiques ou en présence de pratiques agricoles inadéquates (Ziadi et coll. 2007; Landry et Boivin 2013, 2014). Ce problème est accentué par la plus grande variabilité du climat liée aux changements climatiques, avec de plus en plus de périodes d'excès ou de manque d'eau. Ainsi, les producteurs de Pdt sont confrontés de plus en plus souvent à des débuts de saison très pluvieux, alors que les engrais viennent d'être appliqués, ou à des périodes de manque d'eau en pleine période de développement des tubercules, ce qui demande alors des épisodes importants d'irrigation. Cette variabilité des apports d'eau mène d'ailleurs à une hausse constante des superficies irriguées. Si les superficies cultivées en Pdt au Québec étaient estimées à 3 260 ha au début 2000 (BPR 2003), elles ont été évaluées à 5 300 ha en 2012 (Bergeron 2012) puis à près de 6 150 ha en 2016 (Bergeron et coll. 2018), soit environ 36 % des superficies totales en production de pomme de terre.

Les Producteurs de pommes de terre du Québec (PPTQ) considèrent donc toujours comme une priorité de recherche la diminution du lessivage du  $\text{NO}_3$  (PPTQ 2015), car l'application en bandes et le fractionnement des engrais n'ont pas été des solutions suffisantes pour contrer le haut taux de perte du N dans cette culture. Le lessivage du  $\text{NO}_3$  est effectivement encore et toujours le principal mécanisme par lequel se perd le N en production de Pdt (Zebarth et Rosen 2007). Les estimations de quantités de  $\text{NO}_3$  lessivé de diverses régions productrices vont de 10 à 200 kg N- $\text{NO}_3$  ha<sup>-1</sup> (Milburn et coll. 1990; Errebhi et coll. 1998; Gasser et coll. 2002). Le Sous-comité environnement du Comité Pdt CRAAQ a d'ailleurs été mis sur pied suivant le constat de la forte contamination en  $\text{NO}_3$  des puits d'eau potable en région productrice de Pdt (40 %) découlant d'une campagne d'échantillonnage menée par le MDDEP en 2008 et 2009 (Giroux et Sarrasin 2011). Les pertes de  $\text{NO}_3$  et de rendements (RDT) qui leur sont associées demeurent donc aussi une grande préoccupation pour les producteurs. À ce jour, il n'est effectivement toujours pas possible pour eux de déterminer les quantités de N perdues et à compenser. Pourtant, la variabilité des RDT due au lessivage peut entraîner d'importantes baisses de rentabilité pour les entreprises. Une perte de seulement 5,0 t ha<sup>-1</sup> de Pdt diminue en effet les revenus de 1 780\$ ha<sup>-1</sup> (CRAAQ 2019), ce qui est énorme à l'échelle de la ferme et atteint une perte de 30 M\$ pour les 17 100 ha en Pdt au Québec.

Plusieurs équipes de recherche ont donc travaillé à développer des indicateurs calibrés de sol ou de plant ( $\text{NO}_3$  dans le sol en post-levée, pince à chlorophylle, etc.; N'Dayegamiye et coll. 2010), ou des algorithmes intégrant plusieurs paramètres (culture, site, climat) (Tremblay et coll. 2012), visant à calculer les apports de N nécessaires aux cultures selon les sites et les années. Toutefois, aucun indicateur ou logiciel n'a encore été adopté officiellement au Québec pour assurer la gestion du N, car aucun de ceux-ci ne s'est révélé être assez exact ou applicable dans un assez large éventail de conditions. En fait, les modèles de prévision sont longs et coûteux à développer et il demeure qu'on ne pourra jamais prévoir un excès d'eau à l'avance. De plus, à partir d'un certain



stade, il est impossible de retourner appliquer de l'engrais. Ainsi, le développement d'une fertilisation azotée moins sensible aux apports d'eau, basée sur un engrais à libération contrôlée (ELC) peu lessivable, apparaît très pertinent.

Des études réalisées dans la Pdt aux États-Unis, dans l'Ouest canadien, dans les Maritimes et au Québec ont d'ailleurs démontré que le ELC appliqué en totalité en début de saison permet, à doses égales, l'atteinte de RDT équivalents ou plus élevés à ceux obtenus avec l'engrais conventionnel granulaire (ECV) fractionné (Shoji et coll. 2001; Zvomuya et coll. 2003; Wilson et coll. 2009, 2010; Ziadi et coll. 2011; Cambouris et coll. 2015). Toutefois, des quantités souvent très élevées ( $> 200 \text{ kg N ha}^{-1}$ , jusqu'à  $280 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) de ELC et de ECV étaient comparées, faisant en sorte que le TUN n'était pas amélioré et qu'il n'y avait pas de réduction du  $\text{NO}_3$  résiduel ou du  $\text{NO}_3$  lessivé (Bero et coll. 2014). En fait, certains auteurs rapportent autant ou plus de  $\text{NO}_3$  résiduel ou plus de dégagement de  $\text{N}_2\text{O}$  dû à un maintien plus élevé des teneurs en  $\text{NO}_3$  dans la couche de surface du sol (Zebarth et coll. 2012). Ceci est probablement dû au fait que les doses testées étaient trop élevées par rapport aux besoins et que le ELC était appliqué trop tardivement (souvent en post-émergence). Le ELC doit en effet être apporté tôt afin d'éviter que sa libération intensive ne se produise passée les besoins des cultures (Landry et Boivin 2013), laissant des quantités importantes de  $\text{NO}_3$  non prélevées et sujet au lessivage. Sans compter des quantités résiduelles plus importantes de granules non dissouts en post-récolte.

Pour profiter pleinement du ELC, il faut donc tester une régie utilisant une dose abaissée de N comparativement aux doses usuelles recommandées en ECV. En effet, les grilles de référence en fertilisation du Québec pour la Pdt (CRAAQ 2010) recommandent encore des quantités d'apports de N qui tiennent compte du fait qu'une grande partie du N des ECV sera lessivée. Cela laisse donc une marge de manœuvre à exploiter. Une étude réalisée au Québec indique d'ailleurs qu'à doses égales, lorsque du ELC (FRN 44-0-0) ou du CAN (27-0-0) sont appliqués en totalité à la plantation, le ELC produit en continue un flux de  $\text{NO}_3$  dans la couche utile de sol plus élevé que celui du ECV, et ce, sur toute la saison (Ziadi et coll. 2011). De plus, plusieurs travaux réalisés sous nos conditions ont démontré que les prélèvements totaux en N de la Pdt sont fréquemment sous les doses d'application recommandées, fréquemment sous les  $155 \text{ kg N ha}^{-1}$ , avec des valeurs entre  $115$  et  $140 \text{ kg N ha}^{-1}$  et cela, en présence de bons rendements (Landry et Boivin 2010, 2013, 2014). Par ailleurs, il faut aussi déterminer si une partie du N au démarrage doit être apportée sous une forme rapidement libérée. Cela afin de pallier au délai de libération du N du ELC qui dépend de la température (Gandeza et coll. 1991) et qui fait en sorte que seulement 30 % du N sera dégagé durant le premier mois (Labrie 2015). Le fait qu'il ait été démontré que la concentration en  $\text{NO}_3$  du pétiole de Pdt était maximale tôt en saison pour le ECV mais que le maximum était atteint plus tard en saison dans le cas du ELC (FRN) appuie cette idée (Wilson et coll. 2009).

## 1.1 OBJECTIFS

Cette étude vise à développer une régie de fertilisation rapidement et facilement transférable aux producteurs, car elle ne demande pas d'acquisition de nouveaux équipements et utilise en engrais déjà facilement accessible à un coût raisonnable, qui permettra de stabiliser les rendements en Pdt en diminuant les pertes de N par lessivage.

Cela nous permettra de conclure si (1) une partie des besoins en N doit être apportée sous forme ECV au démarrage; (2) s'il est possible de diminuer la dose globale de N apporté, (3) si tout l'engrais peut être appliqué à la plantation. De plus, nous pourrons (4) déterminer l'effet des divers scénarios sur le RDT, le TUN des engrais et le  $\text{NO}_3$  résiduel. Enfin, les revenus et les coûts des différents traitements seront comparés.

## 2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

### 2.1 MISE EN PLACE DE L'EXPÉRIENCE

Le projet s'est déroulé à la Station de recherche expérimentale de l'IRDA à Deschambault (Québec) pendant les saisons de croissance 2017 et 2018 (Figure 1). Les essais ont été tenus dans des sols de type sable loameux/loam sableux dont les caractéristiques sont présentées au Tableau 1. Le cultivar *Goldrush* a été utilisé. Les plantons (tubercules entiers certifiés Élite 4 de calibre 1 ½ à 6 oz) ont été plantés tel que stipulé pour cette variété, à 33 cm d'espacement sur le rang, sur des rangs espacés au 0,93 m pour une densité de plantation de 32 584 plants ha<sup>-1</sup>. Les dates des principales opérations culturales figurent au Tableau 2.



**Figure 1. Essai au champ, projet IA216677, Deschambault, 11 juillet 2018.**

Préalablement à la plantation, les différentes formulations d'engrais de synthèse NPK ont été préparées au mélangeur rotatif sans toutefois y introduire l'engrais à libération contrôlée. Les quantités d'ELC ont plutôt été pesées séparément pour chaque traitement afin d'éviter les risques de ségrégation des deux sortes d'engrais lors du mélange et aussi afin d'éviter que l'action du mélangeur rotatif ne brise les billes d'engrais à libération contrôlée. La journée de la plantation, des sillons de 10 cm de profondeur ont été tracés mécaniquement afin d'y appliquer l'engrais et d'y mettre les plantons. Les engrais ont été appliqué à la main à l'aide de récipients pré-mesurés permettant d'apporter la quantité requise. La totalité des engrais phosphatés et potassiques a été apportée à cette étape. Quant à l'engrais azoté, il était apporté en tout ou en partie à la plantation, selon les différents traitements à l'étude. L'engrais a été recouvert d'une mince couche de sol, au râteau, afin d'éviter le contact direct avec le planton, lesquels ont ensuite été plantés manuellement puis enterrés par un léger buttage manuel du sol (Figure 2). Au fractionnement, dans les traitements qui en requéraient, l'azote a été apporté en bande, à la main, en quantités égales de chaque côté des plants et incorporé mécaniquement par l'opération de

renchaussage des plants. Les doses de fertilisants apportées ont été fixées selon les recommandations du Guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ, 2010). Ainsi, toutes les parcelles ont reçu 75 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 215 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O et 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 215 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O en 2017 et 2018, respectivement. La dose d'azote du traitement référence (régie conventionnelle) a été fixée à 170 kg N ha<sup>-1</sup>. Outre la fertilisation, la régie de production a été similaire à celle utilisée par les producteurs de pommes de terre du Québec et la régie de protection a été faite selon les recommandations du CRAAQ et du Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP). Le défanage des plants s'est fait naturellement, sans ajout de défanant chimique.

**Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol au site d'étude, 2017 et 2018**

Paramètres	2017	2018
pH <sub>eau</sub>	6,09	5,43
Matière organique (M.O.) (%)	1,59	2,79
N-NO <sub>3</sub> (kg ha <sup>-1</sup> b.s.)	9,83	7,21
N-NH <sub>4</sub> (kg ha <sup>-1</sup> b.s.)	3,54	1,58
C <sub>tot</sub> (%)	0,64	1,25
N <sub>tot</sub> (%)	0,05	0,10
C/N	13,17	12,40
Texture	Sable loameux	Loam sableux
Densité apparente (0-30 cm) (g cm <sup>-3</sup> )	1,47	1,20
Éléments majeurs Mehlich-3 (kg ha <sup>-1</sup> b.s.)		
P	504	340
K	123	106
Ca	1207	1279
Mg	46	55
Al (mg kg <sup>-1</sup> )	2777	2863
P <sub>M3</sub> /Al <sub>M3</sub> (%)	18,2	11,9

**Tableau 2. Calendrier des principales opérations culturales dans le dispositif expérimental en 2017 et 2018.**

Opérations	2017		2018	
	DATE	JAP <sup>†</sup>	DATE	JAP
Piquetage, caractérisation du sol et densité apparente	24 mai	-1	29 mai	0
Plantation et application de l'engrais de démarrage	25 mai	0	29 mai	0
Stade post-émergence : prise de sol et plants	20 juin	26	29 juin	31
Fractionnement des engrais et prise de de sol et plants	6 juillet	42	12 juillet	44
Stade floraison : prise de folioles, plants, tubercules	20 juillet	56	24 juillet	56
Stade 60 % de rendement estimé (plants, tubercules, sol)	3 août	70	3 août	66
Stade 100% de rendement estimé (plants et tubercules)	15 août	82	17 août	80
Défanage (plants)	24 août	91	24 août	90
Récolte finale : évaluation rendement	27 sept.	125	3 octobre	127
Prise de sol post-récolte	5 octobre	133	9 octobre	133

† JAP : jours après plantation



**Figure 2. Plantation des tubercules dans le sillon suivant l'application manuelle des engrais, Deschambault, 25 mai 2017.**

Suivant l'implantation, les appareils de mesure ont graduellement été installés sur le site (Figure 3). Les deux années, la culture a été irriguée de façon raisonnée (consigne tensiométrique), par aspersion. Par souci d'uniformité, chaque unité expérimentale était équipée d'un gicleur avec tête de type XCel-Wobbler Medium Angle munie d'une buse (# 12 Nozzle red (3/16'') Senninger; 27) permettant de couvrir un diamètre d'irrigation d'environ 36 pieds. Lorsque la consigne d'irrigation était atteinte, l'ensemble des parcelles était irrigué. Puisque la demande en eau était élevée (débit de 338 lpm), le dispositif a été divisé en deux moitiés, irriguées à tour de rôle la même journée. Les gicleurs possédaient tous un régulateur de pression de 12 PSI permettant de maintenir le débit uniforme lorsque plusieurs gicleurs fonctionnaient simultanément. Une sonde de type TX3 d'Hortau a été placée dans chacune des parcelles recevant du ELC, dans deux répétitions, afin de suivre en continu le statut hydrique dans la zone racinaire et la température du sol à 6 et 12 pouces de profondeur, lesquels contrôlent la libération du N du ELC de type FRN. Les données obtenues des tensiomètres et des sondes de température étaient enregistrées en continu dans un ordinateur à l'aide du logiciel Irrolis-Light (version 1.9) de Hortau. Sur place un pluviomètre (RG3-M de Onset) assurait le suivi de la pluviométrie. Les conditions météorologiques des deux années d'étude sont résumées dans la section 3.1 des résultats.



**Figure 3. Appareil TX3 d'Hortau muni de trois sorties permettant de suivre en continu le statut hydrique du sol et la température à deux profondeurs (gauche) et gicleurs pour irrigation par aspersion (droite).**

## 2.2 TRAITEMENTS COMPARÉS

Ce projet comprenait huit traitements qui variaient selon 1) le type d'engrais azoté utilisé et la proportion d'ECV au démarreur; 2) la quantité totale d'N apportée ( $170 \text{ kg ha}^{-1}$  ou  $140 \text{ kg ha}^{-1}$ ) et 3) la présence ou non de fractionnement en saison. Les engrais comparés étaient l'ECV (nitrate d'ammonium calcique 27-0-0) et l'ELC (urée enrobée FRN 44-0-0) commercialisé par 'Agrium Advanced Technologies'. Le FRN a été choisie car il s'agit de la forme de ELC la plus utilisée sur le terrain actuellement en Pdt. C'est aussi l'une des moins coûteuse. Le FRN se vend 11 % moins cher que le CAN (27-0-0) si on rapporte le coût par unité N. Le phosphore et le potassium ont été apportés avec du triple super phosphate (0-46-0) et du chlorure de potassium (0-0-60) et/ou du sulfate de potassium et de magnésium (0-0-22-11) si le site d'étude en nécessitait, respectivement. Enfin, un témoin non fertilisé en N a été inclus pour connaître la fourniture en azote du sol. La liste des traitements se résume ainsi :

T1: 0 N (Témoin)

T2: 170 N: 100 N (ECV) Plantation + 70 N (ECV) Fractionnement (régie usuelle)

T3: 170 N: 0 N (ECV)/170 N (ELC) Plantation + 0 N Fractionnement

T4: 170 N: 50 N (ECV)/50 N (ELC) Plantation + 70 N (ECV) Fractionnement

T5: 170 N: 25 N (ECV)/75 N (ELC) Plantation + 70 N (ECV) Fractionnement

T6: 140 N: 25 N (ECV)/75 N (ELC) Plantation + 40 N (ECV) Fractionnement

T7: 170 N: 50 N (ECV)/120 N (ELC) Plantation + 0 N Fractionnement

T8: 140 N: 25 N (ECV)/115 N (ELC) Plantation + 0 N Fractionnement

## 2.3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET ANALYSES STATISTIQUES

Les huit traitements, répétés trois fois (blocs), étaient assignés selon un dispositif en blocs aléatoires complets, pour un total de 24 parcelles (Figure 4). Des emplacements différents ont été sélectionnés à chaque année afin d'éviter un effet résiduel des engrais. Les parcelles avaient 10 rangs de 9,0 m de long, espacés aux 0,93 m. Les deux années, le 1<sup>er</sup> et le 10<sup>e</sup> rang ont servi de rangs de garde. Afin de minimiser la compaction du sol, tous prélèvements de plants, de sol et de tubercules lors des récoltes périodiques (ou mini-récoltes) ont été réalisés sur des rangs sélectionnés, en prenant soin de conserver deux rangs uniquement pour l'évaluation du rendement final (Figure 5). Aussi, bien qu'une attention spéciale ait été portée afin ne pas irriguer lors de forts vents, le sens des vents dominants a tout de même été pris en considération dans l'établissement des zones de prélèvements, afin d'éviter les biais pouvant être causés par une répartition inadéquate de l'eau d'irrigation. De plus, aucun échantillonnage n'a été effectué à l'extérieur du périmètre offert par l'irrigation ou dans le premier et dernier mètre des rangs. Ainsi, selon ce plan, le dispositif d'irrigation était situé au centre des rangs 4 et 5. Les rendements étaient prélevés sur les rangs #2 et # 3, et les autres échantillonnages étaient pris ailleurs dans la parcelle. Les récoltes périodiques de tubercules étaient effectuées sur trois plants sains consécutifs et représentatifs de la parcelle. La récolte finale a été effectuée sur 2 x 4 mètres linéaires (7,44 m<sup>2</sup>) dans chacune des parcelles.

Toutes les analyses statistiques du projet ont été effectuées avec le logiciel SAS, version 9.4. Une analyse de la variance a été réalisée pour chacune des variables à l'étude afin d'étudier les effets des traitements de fertilisation sur ces variables. Un modèle mixte normal a été ajusté avec la procédure PROC MIXED de SAS (Littell et coll. 2006). L'effet fixe du modèle était le traitement et les effets aléatoires étaient les blocs et l'erreur résiduelle. Les degrés de liberté ont été calculés avec l'approximation de Kenward-Roger. 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. Ces analyses ont été effectuées par année et par période.

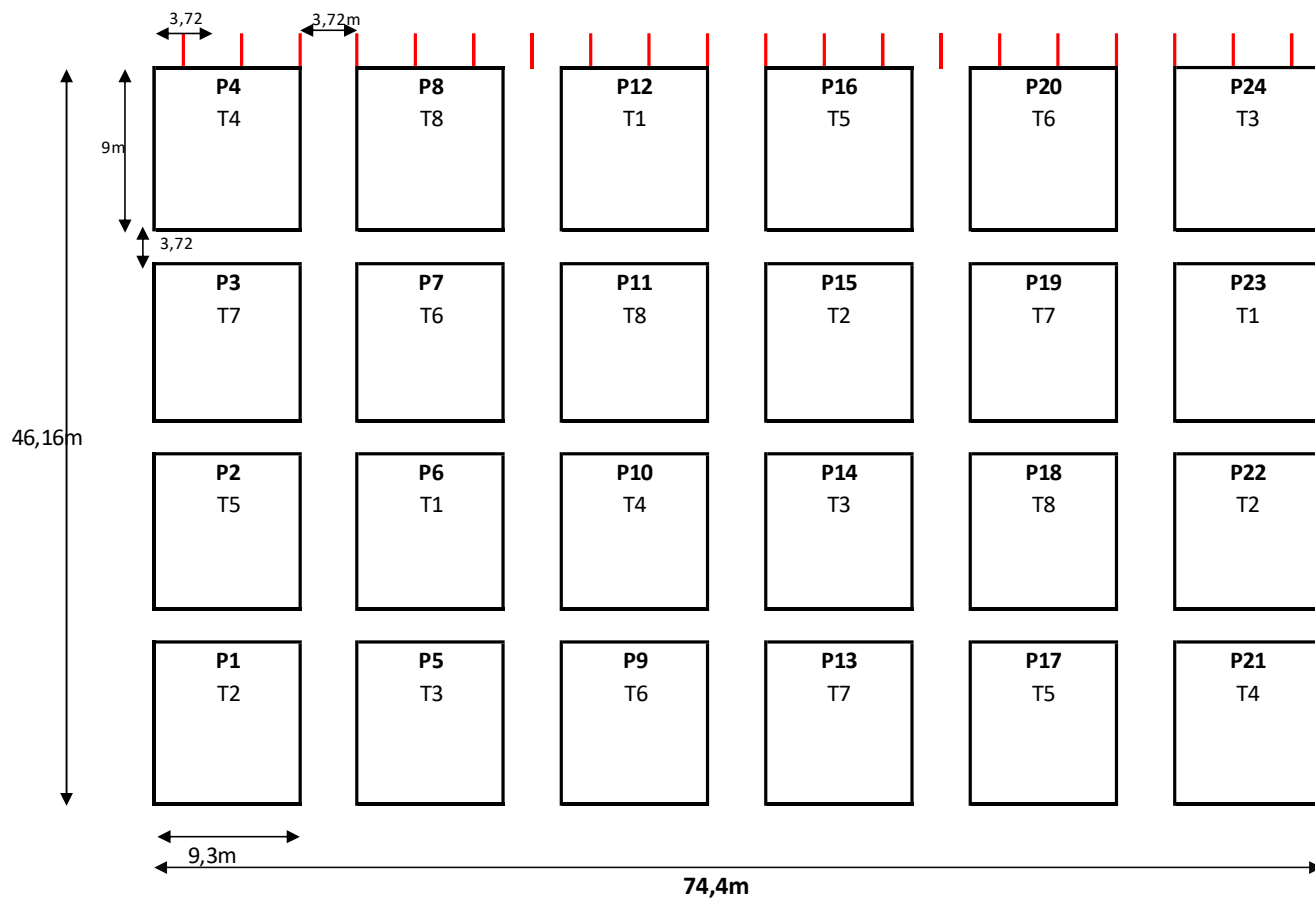


Figure 4. Dispositif expérimental utilisé pour les essais, Deschambault, 2017-2018.



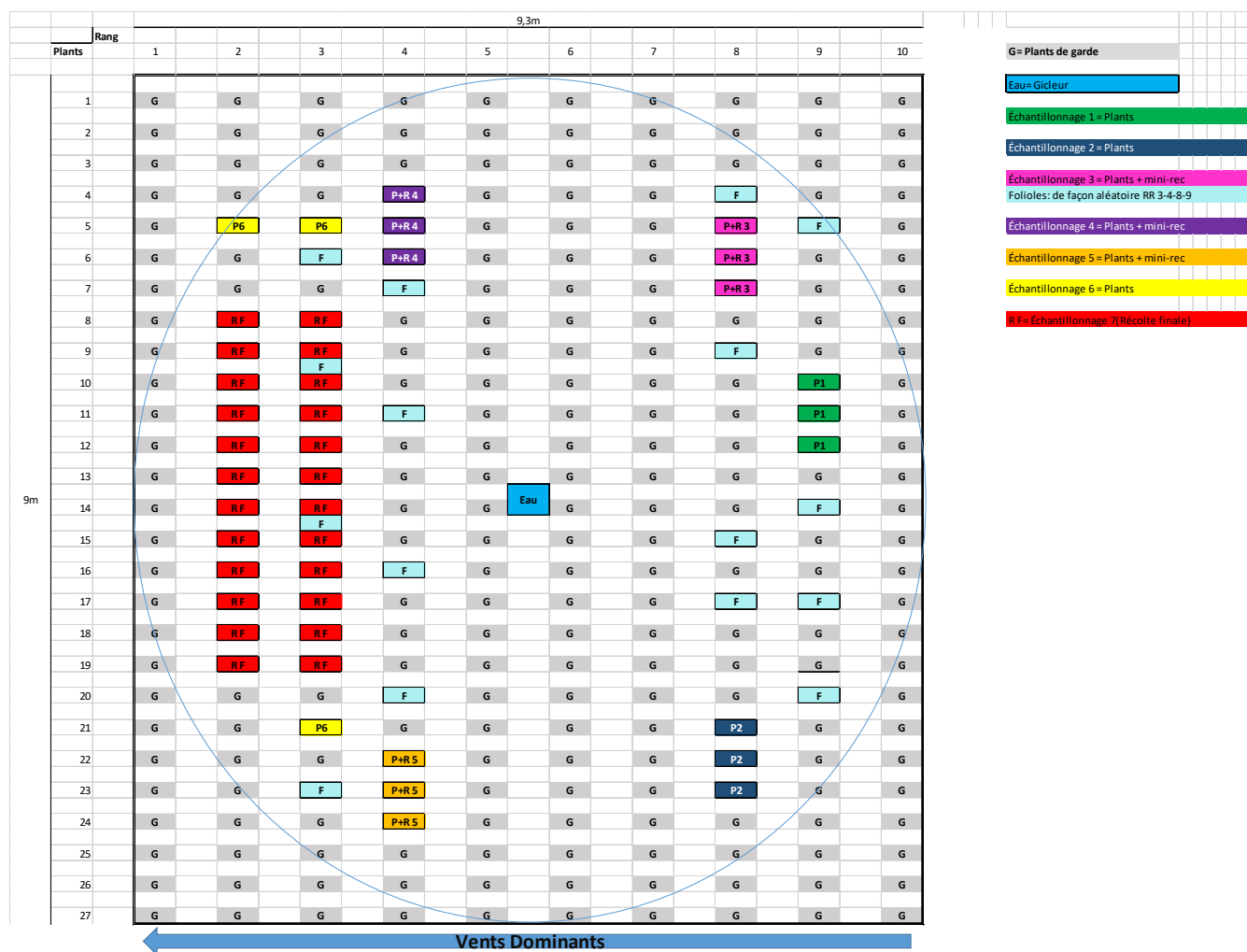


Figure 5. Plan d'échantillonnage établi pour la prise des divers échantillonnages en saison, 2017-2018.

## 2.4 COLLECTE DES DONNÉES ET ANALYSES

Tout au long du projet, des échantillonnages de sol et de végétaux ont été effectués. La répartition de ces activités dans le temps, dont la méthodologie est décrite dans les sections subséquentes, est résumée au Tableau 3. Un suivi agronomique serré, incluant l'observation de l'évolution des stades phénologiques de la culture ainsi que le dépistage des maladies et des ravageurs a été effectué pendant les deux années. Les traitements phytosanitaires requis ont été appliqués.

### 2.4.1 Analyses physiques et chimiques de sol

Les analyses de sol ont toutes été réalisées sur des échantillons composites de 8 sous-échantillons, sauf celle de la masse volumique apparente (MVA) qui a été établie en triplicata. Au printemps de chaque année, lors de l'établissement du site, les échantillons servant à la caractérisation physico-chimique du sol ont été prélevés par bloc dans la strate de sol 0-30 cm afin de déterminer le  $\text{pH}_{\text{eau}}$ , les éléments majeurs Mehlich-3, les teneurs initiales en  $\text{N-NO}_3/\text{N-NH}_4$ , le taux de matière organique, le % de C et N du sol et la granulométrie. Des échantillons de sol non perturbé ont aussi été prélevés à quatre endroits du site afin d'établir en laboratoire la courbe de désorption en eau du sol (Topp et Coll., 1993). En saison, des échantillons ont été prélevés dans la strate 0-30 cm du sol afin de suivre l'évolution des teneurs en nitrates à des stades cibles du développement de la culture de la pomme de terre. À la récolte, les reliquats d'N au sol ont été mesurés jusqu'à 60 cm de profondeur par échantillonnages des strates 0-30 cm et 30-60 cm. Pour cet échantillonnage, les sols ont été prélevés en triplicata par un échantillonneur hydraulique (Giddings). À cette date, le sol prélevé a également été mis en incubation afin de mesurer le pouvoir de minéralisation (mesure de l'azote minéral transformé lors d'une incubation de sol à température pièce) nous renseignant sur le risque potentiel de pollution diffuse lorsque trop d'N peut encore être minéralisé en fin de saison. La MVA a été prélevée dans les strates 0-15 et 15-30 cm simultanément aux échantillonnages de sol en saison afin de pouvoir convertir les ppm de nitrates en charge ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), mesure plus concrète de la charge en nitrate du sol. À la récolte, la MVA a toutefois été prise au moyen de l'échantillonneur hydraulique, comme les sols.

Dans tous les cas, les sols prélevés étaient placés dans une glacière et conservés à 4 °C jusqu'à leur analyse au laboratoire. La MVA a été mesurée par l'insertion d'un cylindre de cuivre de 65 mm de hauteur au centre de la strate de sol échantillonnée. Le sol récupéré des cylindres était ensuite séché à 105 °C afin d'en retirer l'eau puis pesé et divisé par le volume interne du cylindre afin d'obtenir une densité en  $\text{g cm}^{-3}$ . 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  $\text{pH}_{\text{eau}}$  a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des productions végétales du Québec, 1988). Les contenus en carbone (C) et azote (N) totaux ont été mesurés par combustion au LECO. Le N minéral ( $\text{N}_{\text{min}}$ ) sous forme de nitrate ( $\text{N-NO}_3$ ) et d'ammonium ( $\text{N-NH}_4$ ) a été extrait au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminé par colorimétrie avec un auto analyseur Technicon. 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. L'incubation des sols a été conduite à température ambiante pendant 10 jours (Fox et Piekielek, 1978; Juma et Paul, 1984). Les contenus en  $\text{N}_{\text{min}}$  ( $\text{N-NO}_3$  et  $\text{N-NH}_4$ ) au temps zéro et à la fin de l'incubation ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et dosés par colorimétrie au Technicon.

**Tableau 3. Paramètres analysés selon les périodes de développement de la culture et le nombre de jours après plantation (JAP), à chaque année.**

Paramètres	Plan d'analyse annuel							
	Caractérisation printemps (par bloc)	2-3 sem post-émergence	Fractionnement	Floraison	Prélèvement max (60 % rendement estimé)	100 % rendement estimé	Pré-défanage	Récolte finale
	Carac printemps	25 JAP	40-45 JAP	56 JAP	70 JAP	80-85 JAP	90-95 JAP	130 JAP
<b>Sol chimie</b>								
pH eau (1:1)	✓							
Matière organique (perte au feu)	✓							
Azote minéral N-NH <sub>4</sub> + N-NO <sub>3</sub> (KCL 2M) ( 0-30 cm)	✓	✓	✓		✓			✓
Azote minéral N-NH <sub>4</sub> + N-NO <sub>3</sub> (KCL 2M) (résiduel 30-60 cm)								✓
Éléments Mehlich-3 (P,K,Ca,Mg, Na)	✓							
N total et C total LECO	✓							
<b>Sol physique</b>								
Granulométrie par densimétrie et tamisage des sables	✓							
Courbe de désorption du sol 6 points	✓							
Masse volumique apparente (MVA)	✓	✓	✓		✓			✓
<b>Sol biologie</b>								
Potentiel de minéralisation N-NO <sub>3</sub> et N-NH <sub>4</sub> (incubation 10 jours)								✓
<b>Plantes</b>								
Carbone et Azote total (LECO)								
PLANTS complets		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
TUBERCULES				✓	✓	✓		✓
FEUILLES				✓				
% Matière sèche 105°C								
PLANTS complets		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
TUBERCULES				✓	✓	✓		✓

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

Le statut nutritionnel azoté de la culture a été évalué une fois en saison suivant un prélèvement foliaire de seize folioles par parcelle au stade floraison. L'analyse du  $N_{\text{total}}$  dans la plus jeune feuille mature entièrement déployée est en effet reconnue comme un indicateur nutritionnel fiable dans la culture de la pomme de terre. 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  $N_{\text{total}}$  a été dosé par combustion LECO.

À six reprises durant la saison (Tableau 3), les fanes (parties aériennes) de trois plants sains et représentatifs par parcelle ont été prélevées pour suivre l'évolution de la masse sèche (MS) et des prélèvements en N de la biomasse aérienne. Pour se faire, la teneur en  $N_{\text{total}}$  (%) des fanes a été déterminée à chaque date d'échantillonnage suivant un séchage des plants et un dosage par combustion LECO. Les prélèvements en N ont ensuite été calculés comme suit :

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

De plus, à trois périodes cibles durant la saison (floraison, 60 % des prélèvements estimé et 100% rendement estimé), des récoltes de tubercules ont été effectuées. Le but de ces récoltes n'était pas de déterminer un rendement à l'hectare mais de mieux caractériser le développement des tubercules selon les diverses régions testées. Ainsi, lors de ces récoltes périodiques, le poids total en tubercules de trois plants consécutifs a été mesuré et les tubercules dénombrés. 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. Le  $N_{\text{total}}$  a été extrait et dosé tel que décrit pour les plants. Ces récoltes ont permis d'avoir un portrait plus global des prélèvements en N à ces stades de production en additionnant les prélèvements des fanes à ceux des tubercules. Les prélèvements en  $N_{\text{total}}$  ont été calculés comme suit :

- $PVL N_{\text{total}} \text{ tubercule} = MS \text{ tubercule} * \text{concentration en } N_{\text{total}} \text{ tubercule}$
- $PVL N_{\text{total}} \text{ global} = PVL N_{\text{total}} \text{ Plant} + PVL N_{\text{total}} \text{ tubercule}$

En fin de saison, les tubercules ont été récoltés sur une plus grande superficie, soit 7,44 m<sup>2</sup> (4 m linéaire sur deux rangs) afin d'établir les rendements totaux et vendables à l'hectare. Après avoir été grossièrement lavés, les tubercules ont été classés par calibre par criblage mécanique selon des grosseurs s'apparentant à celles des normes de l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) pour les pommes de terre de tous types. Les grosseurs étaient les suivantes : Grelot (rejet) : diamètre ≤ 1 7/8 po; Canada #1 : diamètre > 1 7/8 po et ≤ 3 po; Canada #1 grosses : diamètre > 3 po et ≤ 4 1/2 po; Jumbo : diamètre > 4 1/2 po. (ACIA 2015). Par la suite 25 tubercules ont été prélevés de façon aléatoire dans chacun des lots récoltés. Les tubercules ont été évalués individuellement pour déterminer un indice pour la rhizoctonie (*Rhizoctonia solani*) et pour la gale commune (*Streptomyces scabies*), tenant compte à la fois de la sévérité des symptômes 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. Pour ce faire, 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 lots, puis préparé et analysé pour la teneur en  $N_{total}$  tel que décrit pour les récoltes périodiques. Cette information a servi au calcul des exportations totales en N de la culture. Elle a aussi permis d'établir le prélèvement total en N pour la saison, en additionnant les exportations par les tubercules à celles des plants dosés juste avant leur défanage:

- $EXP N_{total} = \text{Rendement total en tubercules (b.s.)} * \text{concentration en } N_{total} \text{ des tubercules à la récolte}$
- $PVL N_{total} \text{ total en fin de saison} = N_{total} \text{ exporté par les tubercules} + N_{total} \text{ des plants avant défanage}$

### 2.4.3 Calcul du taux d'utilisation apparent de l'azote (TUN)

Une fois les prélèvements totaux connus pour chacun des traitements, le taux d'utilisation apparent du N (TUN) a pu être calculé. Le TUN s'établit en comparant la quantité de N fournie par les engrais de synthèse en comparaison de ce que le sol seul fournit. Pour obtenir le coefficient d'efficacité (CE) des diverses régies à l'essai comprenant du ELC, le TUN obtenu pour chacune des régies est ensuite comparé à celui obtenu avec la régie usuelle (T2: 170 N: 100 N (ECV) Plantation + 70 N (ECV) Fractionnement), testée en même temps, dont l'efficacité est la mesure étalon. En effet, bien que le TUN des engrais de synthèse 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 CE permet de comparer des produits fertilisants et d'établir leur potentiel comme fertilisant N. Le TUN et le CE sont donc calculés selon l'équation suivante (Giroux et coll. 2007) :

$$(1) \text{ TUN étalon (\%)} = \frac{PVL_{total} N (100 \text{ ECV} + 70 \text{ ECV}) - PVL_{total} N \text{ du témoin non-fertilisé ON}}{\text{Dose apportée de N en engrais de synthèse}}$$

$$(2) \text{ TUN testés (\%)} = \frac{PVL_{total} N \text{ du traitement testé} - PVL_{total} N \text{ du témoin non-fertilisé ON}}{\text{Dose apportée de N en engrais du traitement testé}}$$

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

## 2.5 ANALYSE ÉCONOMIQUE

Une analyse économique ayant pour but d'identifier la combinaison la plus rentable des différentes stratégies proposées dans le cadre du projet a été réalisée. Les quantités d'engrais appliquées (ELC et ECV) et les rendements bruts et vendables de pomme de terre obtenus ont été utilisés pour mesurer la différence entre les traitements. Pour évaluer la combinaison d'engrais la plus rentable, le coût de l'azote par tonne de pomme de terre produite a été calculé. La combinaison offrant le meilleur potentiel de rentabilité a été déterminée comme étant celle qui a présenté le plus faible coût de fertilisation azoté par unité de pomme de terre vendable. Le témoin n'a pas été pris en compte pour l'analyse économique, car il n'a pas fertilisé et donc son coût de fertilisation est nul.

Le prix unitaire du nitrate d'ammonium calcique (27-0-0) a été pris dans les références économiques du CRAAQ (CRAAQ 2018). Pour les fins d'analyse, les prix moyens de 2016-2018 ont été retenus. Le prix unitaire de l'ELC a été le prix donné par le fournisseur pour l'année 2018 (Bourbonnais 2019). Étant donné que le prix de l'ELC est fonction directe de celui de l'urée, le prix de l'ELC pour les années 2014 à 2017 a été estimé en utilisant un facteur d'ajustement (1,38) du prix de l'urée lors des mêmes années. Le prix de l'urée a été pris dans les références économiques du CRAAQ (CRAAQ, 2018). Sur la base des prix des engrais, le prix du kilogramme d'azote a été calculé pour les deux types d'engrais. Ces derniers sont présentés au Tableau 4, lequel contient aussi les prix des années 2014 et 2015 pour illustrer les variations annuelles sur une plus grande période. L'analyse effectuée dans le cadre du projet n'a toutefois pas tenu compte de coûts éventuels associés à des éléments de logistique comme le mélange et le transport des deux types d'engrais pour leur utilisation à la ferme.

**Tableau 4. Prix unitaire de l'azote des engrais.**

	2014	2015	2016	2017	2018
Prix de l'azote d'ECV (\$/kg N)	2,42	2,60	2,48	2,24	2,25
Variation annuelle	--	7%	-4%	-10%	0%
Prix de l'azote d'ELC (\$/kg N)	2,29 \$	2,44 \$	2,20 \$	2,05 \$	2,08 \$
Variation annuelle	--	7%	-10%	-7%	2%
Rapport prix ECV sur ELC	1,06	1,06	1,13	1,10	1,08

## 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

---

### 3.1 CONDITIONS CLIMATIQUES ET DISPONIBILITÉ EN EAU

Les Figures 6 et 7 rapportent les conditions météorologiques (T Max et Min (°C) et pluviométrie (mm)) enregistrées en 2017 et 2018 sur toute la période d'essai. Pour l'année 2017, toutes les données de température et la pluviométrie entre 1<sup>er</sup> et le 19 juin proviennent de la station Deschambault SM (Agrométéo) (latitude 46.676783; longitude -71.924858; élévation 22 mètres). Les précipitations du 19 juin au 24 août proviennent du pluviomètre installé au site d'essai. Pour l'année 2018, les données de température proviennent également de la station Deschambault SM et celles du pluviomètre installé au site d'essai.

En 2017, des températures sous les normales saisonnières ont prévalu et le temps a été beaucoup plus couvert que la normale sur tout le début de saison. En 2018, la saison a été beaucoup plus chaude et ensoleillée dès le départ des cultures que lors de l'année 2017. Il y a même eu un excès de chaleur et un manque d'eau sur l'ensemble du territoire. Le mois de juillet, entre autres, a été caractérisé par des températures supérieures à la normale et des précipitations inférieures à la normale (FADQ 2019). La période du 3 au 16 juillet a été particulièrement touchée, avec des précipitations en grande partie inférieures à la normale. L'irrigation de la culture a toutefois permis de contrer ces conditions adverses.

En ce qui a trait aux températures du sol, celles-ci sont présentées en annexe. En 2017, la température s'est réchauffée uniquement à partir du 7 juin, avec des mesures avoisinant les 17,5 °C. Les sondes insérées à 30 cm (12 pouces) dans le sol ont présenté des températures légèrement inférieures à celles situées à 15 cm (6 pouces). En moyenne, les températures se sont maintenues entre 17 et 21,5 °C pour la période de croissance active de la culture. En 2018, des problématiques de fonctionnement avec les sondes n'ont pas permis d'enregistrer de valeurs fiables avant le début juillet. Les mesures prises par la suite corroborent cependant les conditions de grandes chaleurs qui ont prévalu, avec des températures moyennes se maintenant entre 18 et 22,5 °C. Pour la période du 23 juillet au 17 août, tant à 15 qu'à 30 cm, les températures se sont maintenues au-dessus des 20 °C.

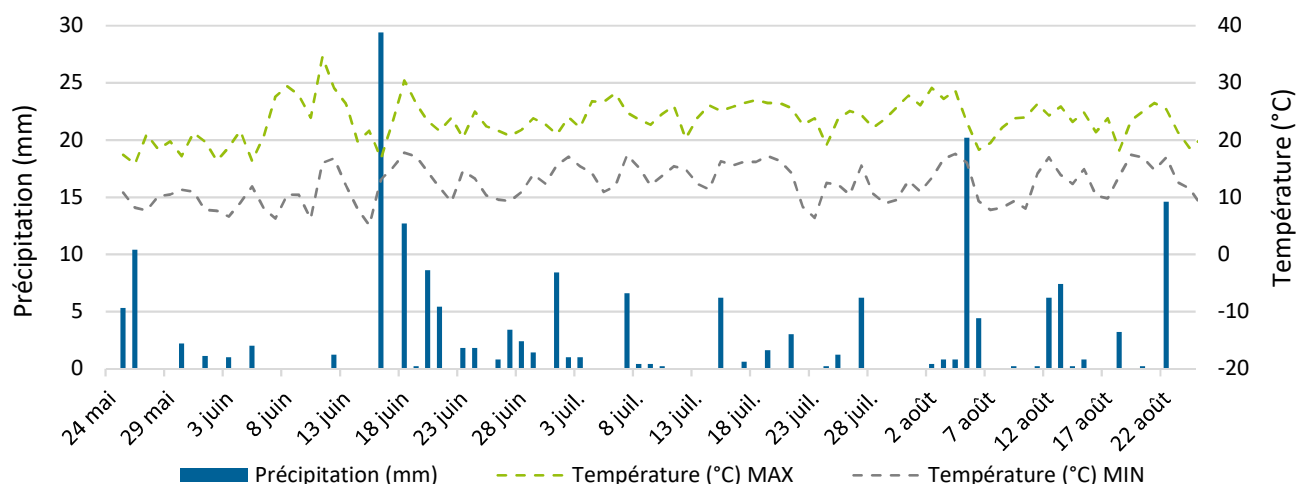


Figure 6. Données climatiques au site d'essai pour la saison de croissance 2017.

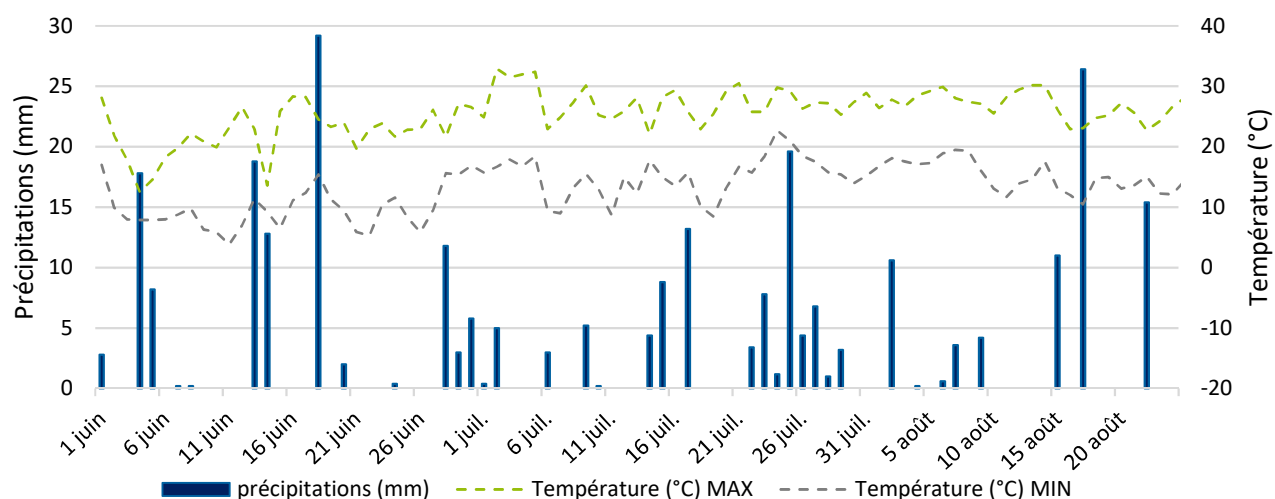


Figure 7. Données climatiques au site d'essai pour la saison de croissance 2018.

Lors des périodes de manque d'eau, des irrigations ont été effectuées afin d'éviter que les plants ne subissent de stress hydrique. Les irrigations étaient déclenchées afin de maintenir le plus possible la réserve en eau du sol à 50 – 65 % (Boivin et Landry 2011) et ce, afin de permettre aux plants d'être dans des conditions optimales de développement et ainsi répondre aux objectifs de l'étude. En 2018, les irrigations ont été plus nombreuses et ont débuté plus tôt en saison qu'en 2017. Plus de deux fois les volumes de 2017 ont été appliqués. Il y a eu six irrigations entre le 29 mai et le 3 juillet en 2018, alors qu'en 2017, aucune irrigation n'a été requise avant le 9 juillet (Tableau 5). Toutefois, en 2017, dans la période qui s'échelonnait du 9 au 24 juillet, un bris du système a compromis les irrigations, de sorte que deux irrigations ont pu être effectuées, de volume moindre que requis. Les moments précis d'apports en eau ainsi que le suivi tensiométrique à chacune des saisons sont présentés en annexe. Les graphiques obtenus suivant les mesures avec des tensiomètres ne sont toutefois pas parfaits. Nous constatons en effet que certains facteurs terrain ou de logistique compromettent leur prise de données en continu (conditions météorologiques qui conduisent à un arrêt des équipements électroniques, interruption



momentanée de la communication des sondes avec la base, affaiblissement rapide des piles qui conduit à l'interruption du signal). De plus, la configuration physiologique du plant de pomme de terre, qui forme un parapluie surplombant la butte de sol, ne permet pas à l'eau apportée d'atteindre le centre de la butte de sol, où se situe précisément le tensiomètre. Ainsi, malgré un apport d'eau, il arrive que la tension exercée par le sol sec soit si forte que le tensiomètre se décharge. Les valeurs ne sont alors plus lues ou ne sont plus représentatives jusqu'à ce que les tensiomètres soient rechargés manuellement.

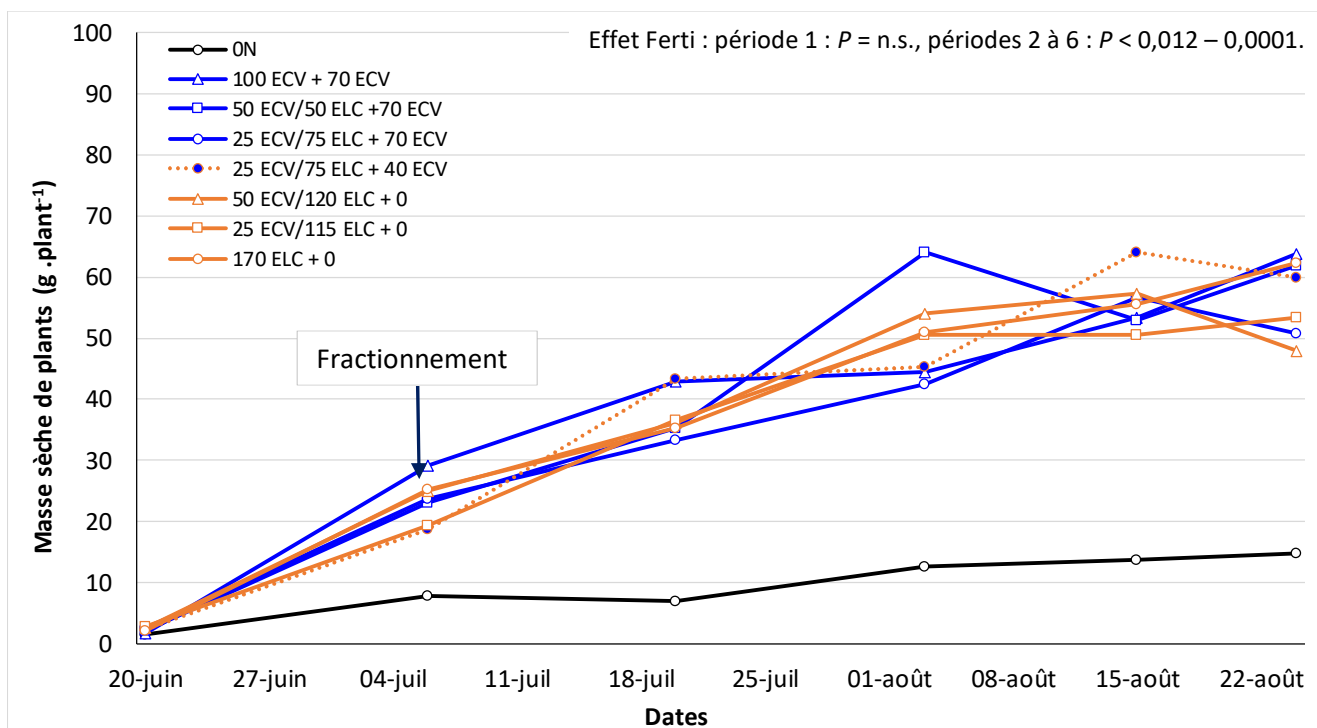
**Tableau 5. Irrigations effectuées dans le dispositif expérimental lors des saisons 2017 et 2018 selon les différentes périodes de prises d'échantillons.**

Années	JAP	Nombre d'irrigations						Total	
		0-30	30-45	45-60	60-70	70-80	80-127	Épisodes	Apports d'eau (L estimés)
2017	Dates	25 mai au 24 juin	24 juin au 9 juil.	9 au 24 juil.	24 juil. au 3 août	3 au 13 août	13 août au 29 sept.	6	115 400
		0	0	2*	3	1	0		
2018	JAP	0-30	30-45	45-60	60-70	70-80	80-127	10	255 190
	Dates	29 mai au 28 juin	28 juin au 13 juil.	13 au 28 juil.	28 juil. au 7 août	7 au 17 août	17 août au 3 oct.		

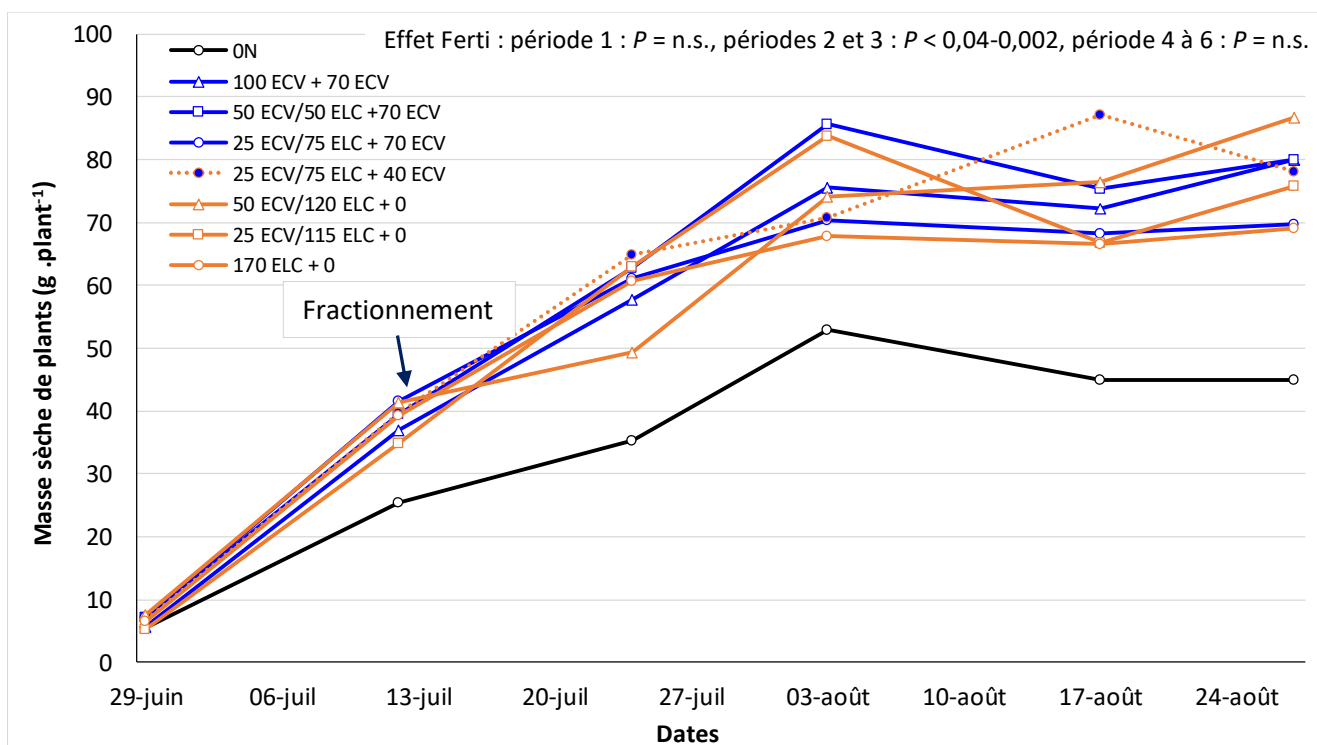
\* Irrigations avec un système d'appoint puisque le système par aspersion n'était pas encore fonctionnel.

## 3.2 DÉVELOPPEMENT ET NUTRITION DES PLANTS

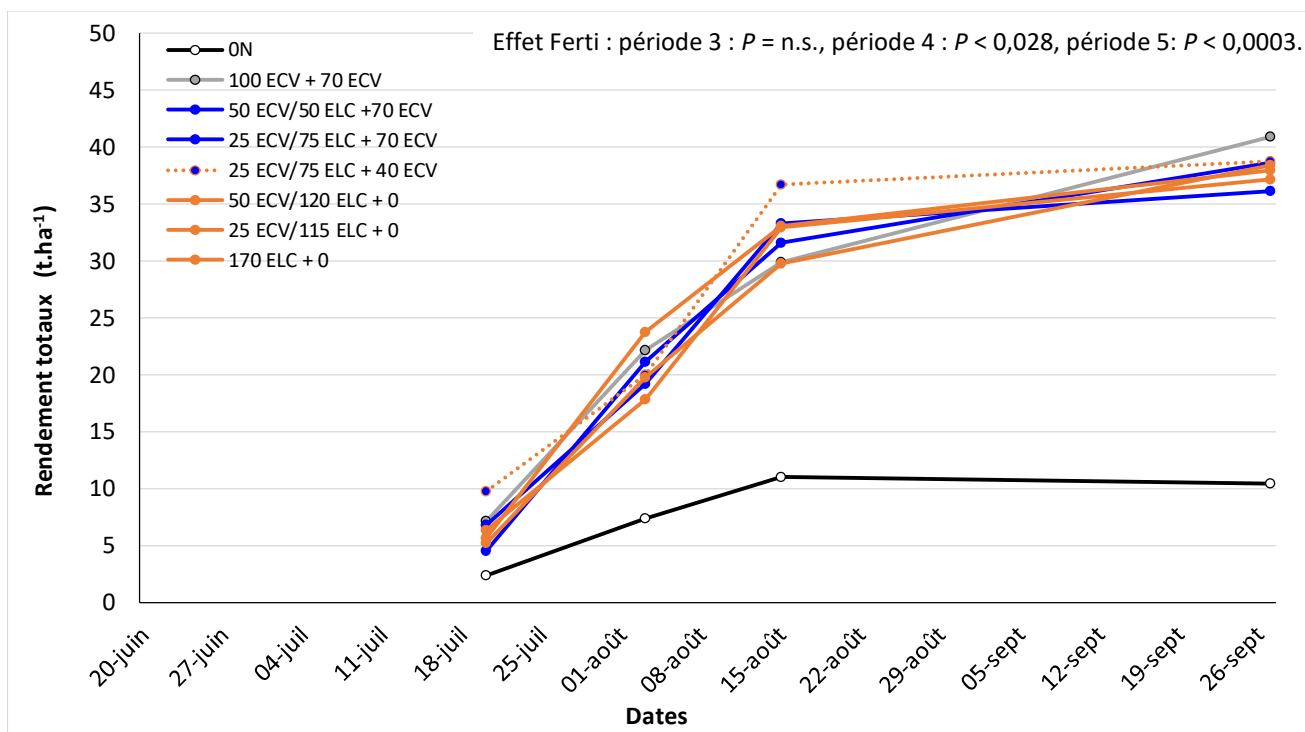
En 2017 et 2018, tout au long de la saison de croissance (6 périodes d'échantillonnage de juin à fin août : période 1 : post-émergence; période 2 : pré-fractionnement; période 3 : floraison; période 4 : 60 % prélèvements estimés; période 5 : 100 % rendement estimé; période 6 : pré-défanage), les masses de plants fertilisés en N ont été équivalentes et rapidement supérieures à celle du témoin ON (Figures 8 et 9). Ainsi, les figures 8 et 9 présentent les traitements ayant majoritairement de l'ECV en bleu et ceux ayant majoritairement du ELC en orange, avec le traitement mitoyen en pointillé. Ceci permet de voir rapidement que les différentes régies de fertilisation testées donnent des évolutions de masse de plants similaires entre elles. De même, les récoltes périodiques sur 3 périodes (mi-juillet à mi-août) en saison, qui permettent de voir l'évolution de la croissance des tubercules, révèlent que leur développement de masse totale était le même entre toutes les régies fertilisées en N, et supérieur à celui des plants témoin ON (Figures 10 et 11). La hausse très rapide de biomasse en 25 jours entre les périodes 3 (mi-juillet) et 5 (mi-août) démontre l'importance de cette période pour le développement du rendement final. Les deux saisons, l'ensemble des régies fertilisées en N ont permis un développement similaire, fortement supérieur à celui du témoin ON, avec des hausses de 5 fois (+ 26 kg ha<sup>-1</sup> de MS de tubercules, 85 % du rendement total final atteint) et 3 fois (+ 18 kg ha<sup>-1</sup> de MS de tubercules, 65 % du rendement total final atteint) de la masse de tubercules entre la 3<sup>e</sup> et la 5<sup>e</sup> période en 2017 et 2018, respectivement.



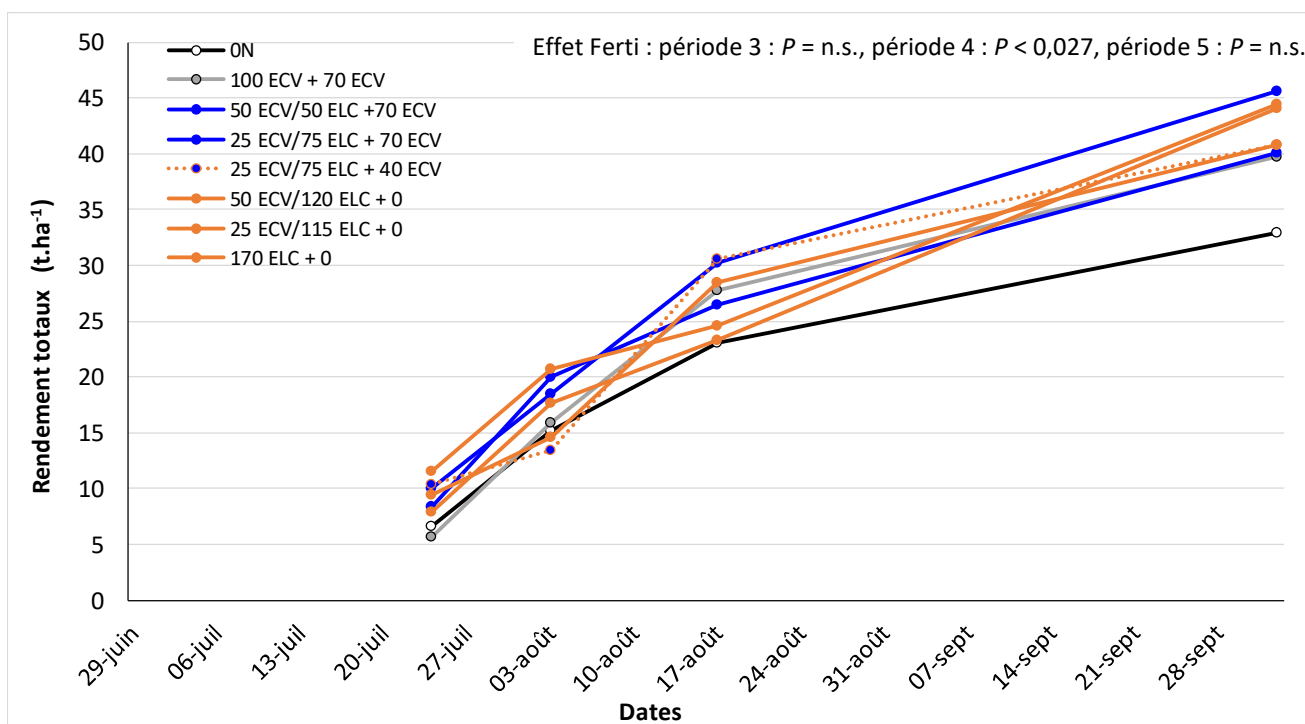
**Figure 8. Évolution de la masse des plants en 2017 en cours de saison (périodes 1 à 6).** Pour chaque graphique, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P \leq 0,1$ . Les régies avec prédominance d'ECV sont en bleues et celles à prédominance d'ELC en orange.



**Figure 9. Évolution de la masse des plants en 2018 en cours de saison (périodes 1 à 6).** Pour chaque graphique, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P \leq 0,1$ . Les régies avec prédominance d'ECV sont en bleues et celles à prédominance d'ELC en orange.



**Figure 10. Évolution de la masse totale produite en tubercule en 2017 en cours de saison (périodes 3 à 5 et récolte finale).** Pour chaque graphique, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P \leq 0,1$ . Les régies avec prédominance d'ECV sont en bleues et celles à prédominance d'ELC en orange.

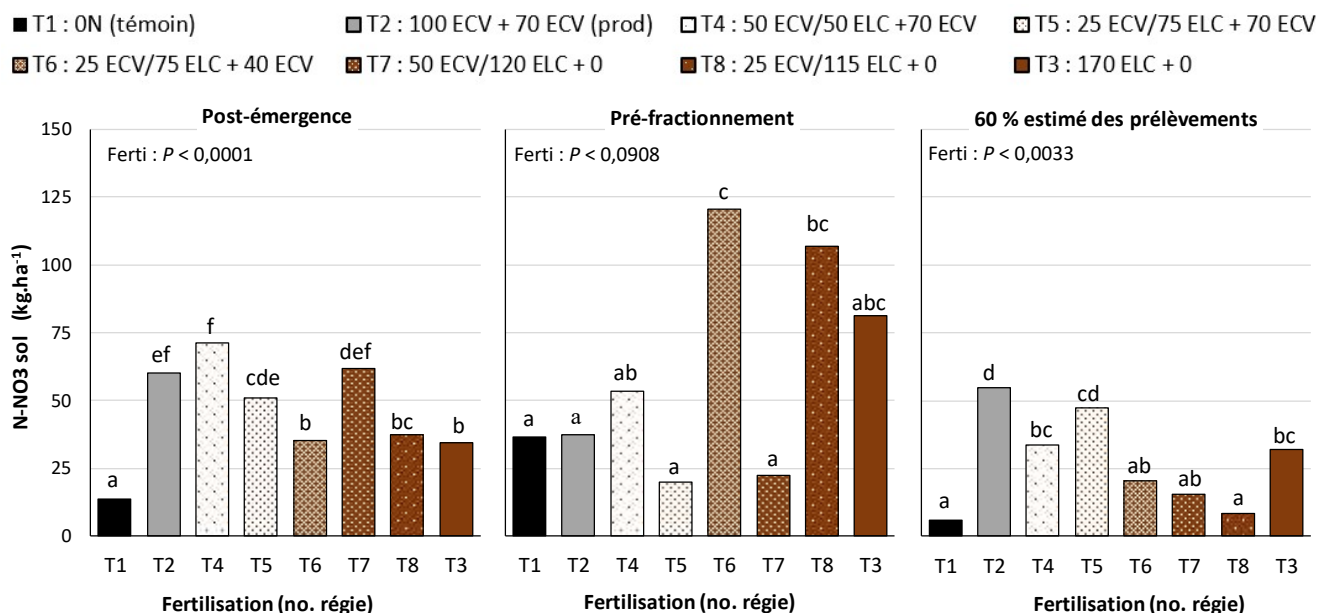


**Figure 11. Évolution de la masse totale produite en tubercule en 2018 en cours de saison (périodes 3 à 5 et récolte finale).** Pour chaque graphique, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P \leq 0,1$ . Les régies avec prédominance d'ECV sont en bleues et celles à prédominance d'ELC en orange.

### 3.3 CONTENU EN N DISPONIBLE DU SOL EN SAISON

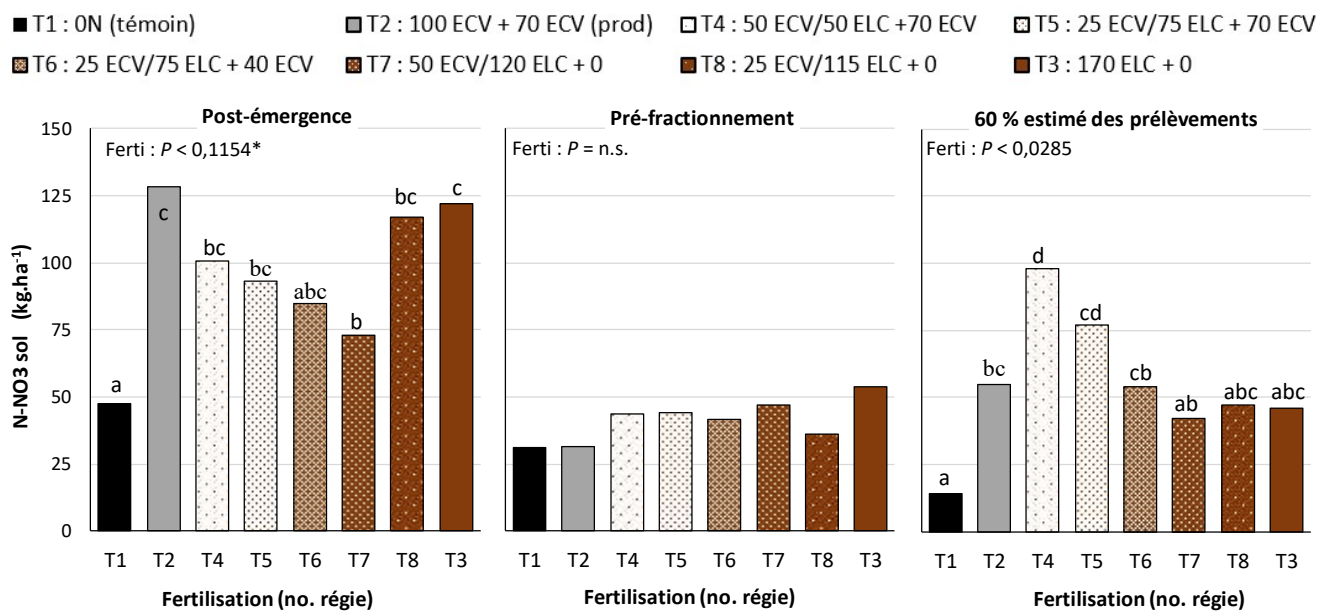
En 2017, la fertilisation a fortement influencé les teneurs en nitrate disponible du sol en saison aux 3 stades étudiés (post-émergence (20 juin), pré-fractionnement (6 juillet), 60 % estimé du prélèvement en N (3 août)) (Figure 12). Selon les données prises en post-émergence, ce sont les 3 régies apportant 50 ou 100 kg N ha<sup>-1</sup> sous forme d'ECV (no.2: **100 ECV** + 70 ECV, no.4: **50 ECV/50 ELC** + 70 ECV, no.7: **50 ECV/120 ELC** + 0) qui présentent la plus forte disponibilité en nitrate du sol. Les teneurs n'étant pas différentes statistiquement pour ces trois régies, il appert donc que l'apport à la plantation de 50 kg ha<sup>-1</sup> en remplacement de la dose usuelle de 100 kg ha<sup>-1</sup> d'ECV n'entraîne pas une baisse du N disponible du sol à la culture. Par contre, l'ensemble des 4 régies apportant 25 kg N ha<sup>-1</sup> d'ECV ou moins ont les plus faibles disponibilités en nitrate. Les sols des parcelles des régies no.3 ((**0ECV**)170 ELC + 0), no. 6 (**25 ECV/75 ELC** + 40 ECV) et no.8 (**25 ECV/115 ELC** + 0) sont les moins riches, suivis de celui de la régie no. 5 (**25 ECV/75 ELC** + 70 ECV) (Figure 12). Leurs sols contiennent près de la moitié du contenu en nitrate de ceux des régies no.2, no.4 et no.7. L'apport d'ELC à la plantation ne vient donc pas compenser le manque d'ECV dans les semaines suivant la plantation, même apporté à fortes doses (170 kg N ha<sup>-1</sup>). Ce résultat doit être mis en relation avec les conditions climatiques de 2017. Selon l'État des cultures de la Financière agricole (2019), les conditions printanières ont été froides et pluvieuses dans plusieurs régions. La vitesse de libération du N de l'ELC étant liée aux températures, les délais ont probablement été trop longs sous ces conditions pour que l'ELC puisse assurer son rôle de démarreur malgré les 26 jours écoulés (application d'engrais le 26 mai, échantillonnage de sol le 20 juin). D'ailleurs, en 2018, cette problématique n'est pas observée (voir résultats 2018).

Par la suite, juste avant le fractionnement, soit 42 jours après la plantation, la situation s'inverse et les sols les plus riches en nitrate étaient tous ceux de régies apportant de l'ELC à la plantation (75-170 kg N ha<sup>-1</sup>), tandis que la régie Producteur apportant tout l'engrais sous forme d'ECV à la dose la plus élevée (100 kg N ha<sup>-1</sup>) présentait une disponibilité en nitrate identique au sol non fertilisé en N qui n'est que de 36 % de celles des trois meilleurs traitements. Par la suite, 70 jours après la plantation, soit environ 1 mois après le fractionnement, les teneurs en nitrate se sont abaissées en moyenne autour des 25 kg N ha<sup>-1</sup>. Ces teneurs sont de même ordre que celles mesurées en post-récolte le 5 octobre, 2 mois plus tard. À ce moment, les sols ayant reçu du ELC ne sont pas ceux avec les plus fortes teneurs en nitrate, puisque les sols avec les charges les plus élevées sont ceux des trois régies ayant apporté le moins d'ELC (no.2: 100 ECV + 70 ECV, no.4: 50 ECV/50 ELC + 70 ECV, no. 5: 25 ECV/75 ELC + 70 ECV). Un constat similaire s'observe en post-récolte (voir section 3.7). Il semble donc que l'usage de l'ELC aux doses utilisées n'ait pas occasionné la présence de plus de nitrate résiduel.



**Figure 12. Contenu du sol (0-30 cm) en N-NO<sub>3</sub>, au stade post-émergence, pré-fractionnement et 60 % des prélèvements en N estimés, en 2017.** Pour chaque graphique, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P \leq 0,1$

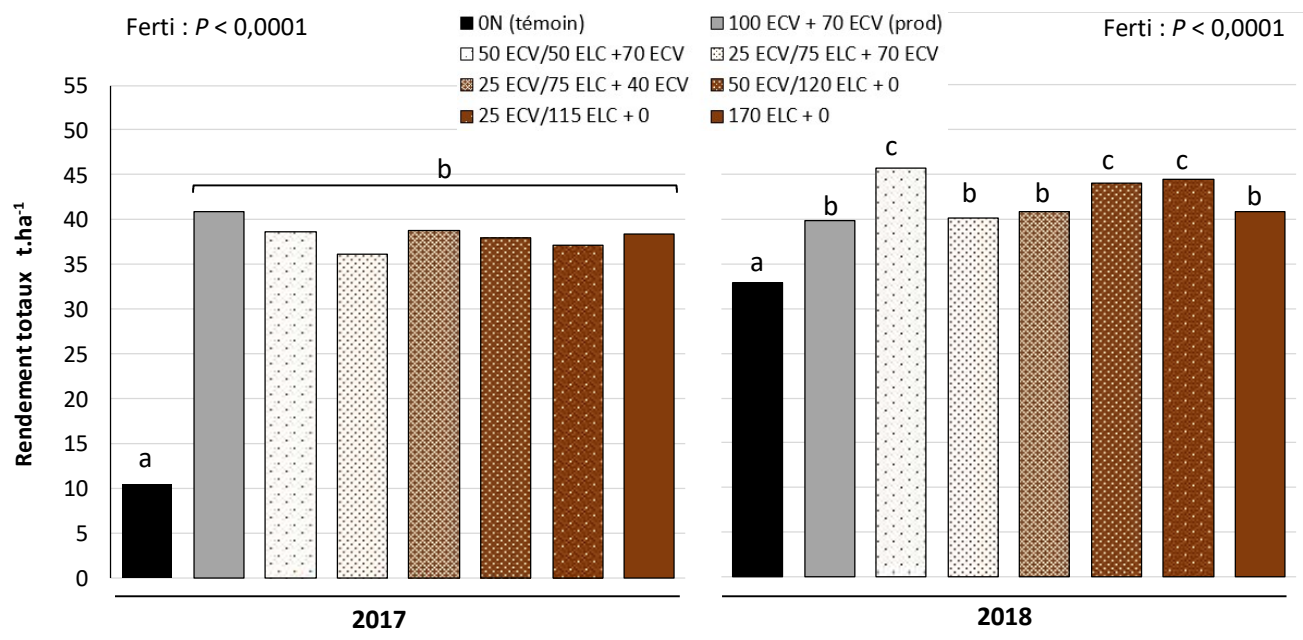
En 2018, en post-émergence (31 JAP), la fertilisation n'a pas eu d'effet significatif sur la disponibilité en nitrate du sol (Figure 13). Il y a une tendance à  $P < 0,1154$ , principalement due au fait que le sol témoin 0N tendait à contenir moins de nitrate. Toutefois, il ne ressort pas d'effet clair du type d'engrais puisque les trois régies donnant les teneurs en nitrate les plus élevées sont très différentes, soit la régie no.2 Producteur avec 100 % d'engrais ECV fractionnée pour une dose totale de 170 kg N ha<sup>-1</sup>, la régie no.3 avec 100 % d'engrais ELC à la plantation pour une dose totale de 170 kg N ha<sup>-1</sup> et la régie no. 8 avec une combinaison ECV/ELC à la plantation et un fractionnement pour une dose totale de 140 kg N ha<sup>-1</sup>. Il semble donc que lorsque les conditions météorologiques sont favorables, l'engrais ELC permet une disponibilité semblable à celle de la régie Producteur. Selon l'État des cultures de la Financière agricole (2019), les conditions de début de saison étaient en effet dans les normales et favorables à la croissance des cultures. Plus tard en saison, juste avant le fractionnement, l'ensemble des sols contenait une charge équivalente en nitrate de 41 kg N ha<sup>-1</sup>. Finalement, le 3 août, 22 jours après l'application de l'engrais au fractionnement, la régie de fertilisation a eu un fort impact ( $P < 0,0285$ ). Ce sont les 4 régies apportant de l'ECV au fractionnement (no.2, no.4, no.5 et no.6) qui donnent le plus de charges de nitrate. Ces régies sont également les seules à présenter de charges plus grandes que celle du sol témoin 0N.



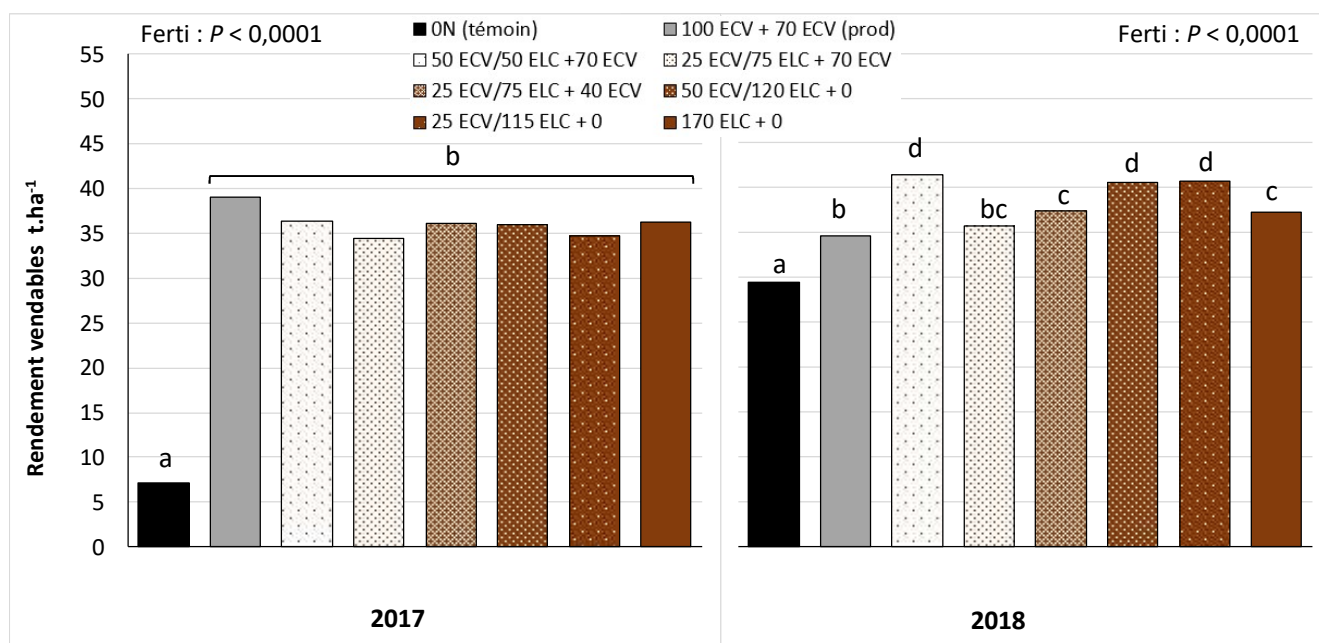
**Figure 13. Contenu du sol (0-30 cm) en N-NO<sub>3</sub>, au stade post-émergence, pré-fractionnement et 60 % des prélèvements en N estimés, en 2018.** Pour chaque graphique, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P \leq 0,1$ . \* Tendence .

### 3.4 RENDEMENTS

À chaque année, en absence de fertilisation azotée, les rendements du témoin ON n'ont atteint en moyenne, que ce soit pour le rendement total ou vendable, que 37 % et 40 % du rendement moyen des autres traitements en 2017 et 2018, respectivement. Ceci confirme que le site utilisé chaque année était très sensible au manque d'apport de N et que le sol n'a pu compenser une régie déficiente en N par une fourniture adéquate *in situ*. Ainsi, en cas de rendements égaux entre différentes régies, cela signifie que chacune a fourni une quantité suffisante de N à la culture. D'autant plus qu'à chacune des années, les rendements atteints sont élevés et dépassent le rendement moyen provincial (2017 : 33,2 t ha<sup>-1</sup>, 2018 : 29,9 t ha<sup>-1</sup>) (ISQ 2019). Pour ce qui est de l'impact des différentes régies apportant du N, en 2017, toutes ont produit des rendements vendables et totaux non différents (Figures 14 et 15). Par contre, en 2018, la régie Producteur était parmi les régies ayant produit le moins de tubercules. La différence était la plus marquée pour le rendement vendable puisque toutes les autres régies ont produit plus de rendement, sauf celle du trt. No.5 (25ECV/75ELC + 70 ECV). À l'opposé, trois régies se distinguent, tant en rendements totaux que vendable (No.4 : 50ECV/50ELC + 70 ECV, No.7 : 50ECV/120ELC+0, No.8 : 25ECV/115ELC+0). Il est difficile d'expliquer pourquoi puisque qu'elles n'apportent pas la même quantité totale de N (140 vs 170 kg N ha<sup>-1</sup>), que certaines sont avec ou sans fractionnement et que les proportions ELC/ECV sont très différentes (de 29 à 82 %). Il est toutefois possible de conclure que la régie No.4, qui fait beaucoup mieux que la régie No.5, diffère de celle-ci uniquement par une proportion ECV/ELC au démarreur plus grande (50/50 vs 25/75), pour une même quantité totale de N apporté. De plus, les régies No.7 et No.8, qui sont celles apportant le plus de N sous forme d'ELC avec la régie No.3, diffèrent de cette dernière principalement par la présence d'ECV au démarreur, ces 3 régies étant sans fractionnement. Il semble donc, sur la base des résultats des deux années, 1) qu'il ne soit pas obligatoire de fractionner la dose apportée de N lorsque de l'ELC est utilisé, 2) qu'une part de N sous forme d'ECV est requise au démarreur et 3) que le remplacement d'une partie de l'ECV par du ELC dans l'engrais apporté n'entraîne pas de baisse de rendement. Des essais supplémentaires seront cependant requis pour fixer la proportion de N à inclure sous forme d'ECV dans le démarreur, de même que pour tester à quel point la dose d'apport de N peut être abaissée par l'incorporation d'une part d'ELC au mélange d'engrais, en comparaison de l'usage de l'ECV seul.



**Figure 14. Rendement total en tubercules frais selon la régie de fertilisation en 2017 et 2018.** Pour chaque graphique, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P \leq 0,1$ .



**Figure 15. Rendement vendable en tubercules frais selon la régie de fertilisation en 2017 et 2018.** Pour chaque graphique, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P \leq 0,1$ .



Pour ce qui est du poids spécifique, la fertilisation azotée n'a eu un impact significatif qu'en 2018 (2017, Ferti :  $P = ns$ ; 2018, Ferti :  $P < 0,0160$ ), alors que les tubercules des parcelles non fertilisées en N présente un poids spécifique plus élevé (1,081). Ainsi, les deux années, les différentes régies ont donné une qualité équivalente de tubercules avec des poids spécifiques moyens de 1,073 et 1,076 en 2017 et 2018, respectivement. Ces valeurs sont au-dessus des valeurs citées dans la littérature, qui se situent entre 1,055 to 1,095 (Agriculture Victoria 2010), indiquant que l'usage d'ELC, en tout ou en partie de la formulation apportée d'engrais, n'a pas nui à la qualité des tubercules.

### 3.5 UTILISATION DE L'AZOTE PAR LA CULTURE

En ce qui a trait aux prélèvements totaux (plants et tubercules), la fertilisation a eu un effet hautement significatif les deux années (2017,  $P < 0,0001$ ; 2018,  $P < 0,0003$ ) (Tableau 6). Toutefois, cet effet est principalement dû au fait que les prélèvements totaux dans les parcelles témoins ON sont très inférieurs à ceux des plants fertilisés en N. En 2018, il s'agit de la seule différence selon les traitements. En 2017, il s'agit également de la principale différence. Toutefois, les régies no.2 (100 ECV + 70 ECV (prod) et no.4 (50 ECV/50 ELC +70 ECV), comportant la plus grande quantité de N sous forme d'ECV, présentent les prélèvements totaux les plus élevés (Tableau 6). Il est à noter que la régie no.4 contient tout de même 29 % d'ELC. Cette meilleure performance de prélèvements des formulations avec plus d'ECV ne s'est toutefois pas traduite par de meilleurs rendements vendables. Il se peut que les faibles besoins d'irrigation prévalant en 2017 aient contribué à cette bonne performance de l'ECV, qui ne ressort pas en 2018, saison ayant requis 2,2 fois plus de litres d'eau irriguée (Tableau 5).

Lorsque les prélèvements sont utilisés pour calculer les taux d'utilisation apparent de l'azote (TUN) des engrais par la culture, il ressort que ceux-ci sont très similaires pour les deux années (Tableau 6). Ils oscillent entre 70 % et 88 % en 2017 et entre 66 % et 86 % en 2018, pour des TUN moyens de 79 % et 77 % en 2017 et 2018, respectivement. Ces niveaux de TUN sont exceptionnels. Il est rare au Québec d'obtenir des pourcentages aussi élevés. Les TUN sont habituellement au mieux de 60 %, étant en moyenne de 45 % et pouvant s'abaisser dans les 30 % lors de mauvaises saisons climatiques ou en présence de pratiques agricoles inadéquates (Ziadi et coll. 2007; Landry et Boivin 2013, 2014). Pour expliquer cette performance, il peut être apporté comme justification que la dose visée d'apport était proche de la quantité requise chaque année (autour de 125 kg N ha<sup>-1</sup> en moyenne) et que l'irrigation a été gérée adéquatement. Ainsi, même si en 2017 les régies avec la plus forte proportion d'ECV présentent de meilleurs prélèvements totaux en N, dans l'ensemble, toutes les régies avec engrais azoté, incluant celles sans fractionnement et/ou comportant une grande part ou exclusivement du ELC, ont permis un haut TUN de l'engrais. De plus, en termes de TUN, des régies avec des quantités élevée d'ELC présentent parmi les TUN les plus élevés. Ceci tient au fait que le TUN se calcule en comparant le N prélevé au total pour chacune des régies de fertilisation, en comparaison de ce que le sol a pu fournir, et relativement à la quantité de N apporté par chacune des régies. Ainsi, les régies no.4 (50 ECV/50 ELC +70 ECV) et no.6 (25 ECV/75 ELC + 40 ECV) comportant 29 % et 54 % d'ELC, respectivement, sont les seules à produire dans les plus hauts TUN les deux années. En comparaison, la régie Producteur no.2 (100 ECV + 70 ECV) qui fait bien en 2017 (TUN = 88 %), présente un des pire TUN en 2018 (TUN = 66 %), année où la culture a été beaucoup plus irriguée.

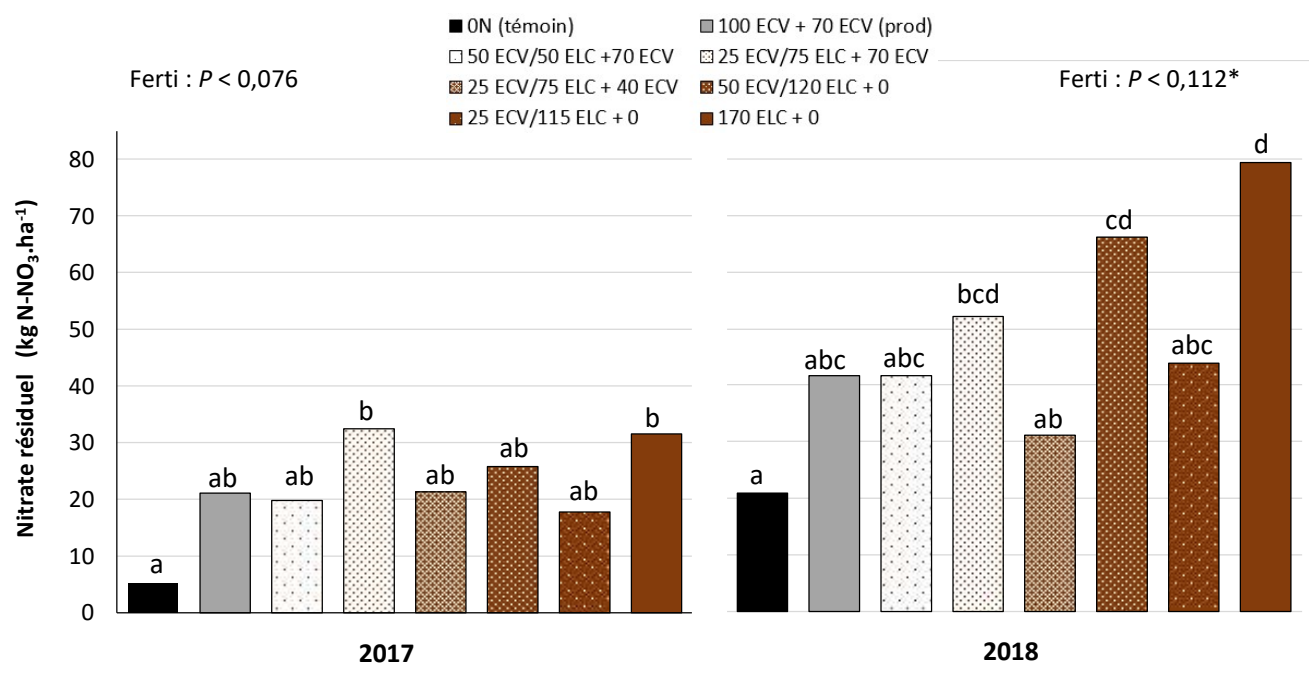
**Tableau 6. Prélèvements totaux en N (plants et tubercules) et taux d'utilisation apparent du N (TUN) selon les différentes régies de fertilisation en 2017 et 2018.**

No.	Traitements	ECV	2017		2018	
		/N tot %	Prlv N total (plants kg ha <sup>-1</sup> b.s.)	TUN %	Prlv N total (plants + kg ha <sup>-1</sup> b.s.)	TUN %
1	ON (témoin sans apport de N)	-	28 a	-	110 a	-
2	100 ECV + 70 ECV (Producteur)	100	178 d	89	221 b	66
4	50 ECV/50 ELC + 70 ECV	71	176 cd	87	257 b	86
5	25 ECV/75 ELC + 70 ECV	56	157 cd	85	222 b	84
6	25 ECV/75 ELC + 40 ECV	46	146 b	76	227 b	66
7	50 ECV/120 ELC + 0	29	147 b	72	253 b	79
8	25 ECV/115 ELC + 0	18	129 b	70	220 b	84
3	170 ELC + 0	0	153 b	74	236 b	74
<b>Valeurs de P</b>			<b>&lt;0,0001</b>		<b>0,0003</b>	

### 3.6 CONTENU DU SOL EN AZOTE MINÉRAL RÉSIDUEL POST-RÉCOLTE

Tout d'abord, il est pertinent de faire ressortir que le sol non fertilisé en N n'est pas dépourvu de nitrate résiduel. La strate utile (0-30 cm) de sol du témoin fertilisé contient ainsi 5 et 21 kg N-NO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> en 2017 et 2018, respectivement. Ainsi, aussi adéquate qu'elle soit, une régie de fertilisation N peut également laisser une part de nitrate résiduel. Dans la présente étude, les valeurs mesurées dans les sols fertilisés en N vont de 18 et 79 kg N-NO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup>. En moyenne, leurs charges en nitrate résiduel sont donc 1,35 et 1,26 fois supérieures à celles des sols non fertilisés en N. En 2017, il y a cependant une influence significative de la formulation sur les quantités de nitrate retrouvées tant dans la couche de surface (0-30 cm) que plus en profondeur (30-60 cm) (Figures 16 et 17). Les traitements présentant le plus de nitrate résiduel sont les régies no.3 (170 ELC + 0) et no.5 (25 ECV/75 ELC + 70 ECV) en surface et les régies no. 2, 4, 5 et 7 plus en profondeur. Cependant, les teneurs de nitrate pour ces régies ne diffèrent pas de celle du traitement Producteur et de celles des autres régies fertilisantes en N. Ainsi, on ne peut statuer pour 2017 que l'emploi d'ELC entraîne plus de nitrate résiduel. En 2018, au premier coup d'œil, une conclusion légèrement différente semble s'observer. Il s'agit toutefois d'une tendance à  $P < 0,112$  pour les régies no.3 (170 ELC + 0) et no.7 (50 ECV/120 ELC + 0), apportant en totalité ou en forte partie sous forme d'ELC la dose de N à la plantation, à présenter les plus fortes charges en nitrate. Par contre, la charge de nitrate laissée par la régie no.5 (25 ECV/75 ELC + 70 ECV), apportant peu d'ELC, est la 3<sup>e</sup> plus élevée et n'est pas statistiquement différente de celles des régies no.3 et no.7. De plus, la régie no.8 (25 ECV/115 ELC + 0), apportant la 2<sup>e</sup> plus grande proportion d'ELC (82 %), également toute à la plantation, n'a pas occasionné de charge en nitrate résiduel statistiquement plus élevée que le sol témoin et les régies no.2, no.4, no.5 et no.6. Enfin, dans la strate inférieure (30-60 cm), la fertilisation n'a eu aucun impact sur les charges de nitrate mesurées. Ainsi, au final, bien que la régie no.3 apportant tout l'engrais N sous forme d'ELC (100 % ELC) à la plantation soit, les deux années, parmi les traitements ayant laissé le plus de nitrate résiduel dans la strate 0-30 cm de sol, il n'est pas possible de conclure sur la base des résultats des deux années que l'emploi d'ELC, même en forte proportion du mélange d'engrais (ex. 82 % ELC dans la régie no.8), entraîne systématiquement une hausse du nitrate résiduel post-récolte plus grande que celle découlant de l'utilisation de l'ECV. Les résultats des

incubations de sol post-récolte (Tableau 7), visant à mesurer ce que le sol peut encore fournir en nitrate sous des conditions favorisant la minéralisation pendant 10 jours, appuie ce constat puisque les deux années la fertilisation n'a eu aucun impact sur le nitrate généré.



**Figure 16. Contenus en nitrate résiduel de la strate 0-30 cm de sol suivant la récolte des pommes de terre, le 5 octobre 2017 et le 9 octobre 2018. \* Tendence.**

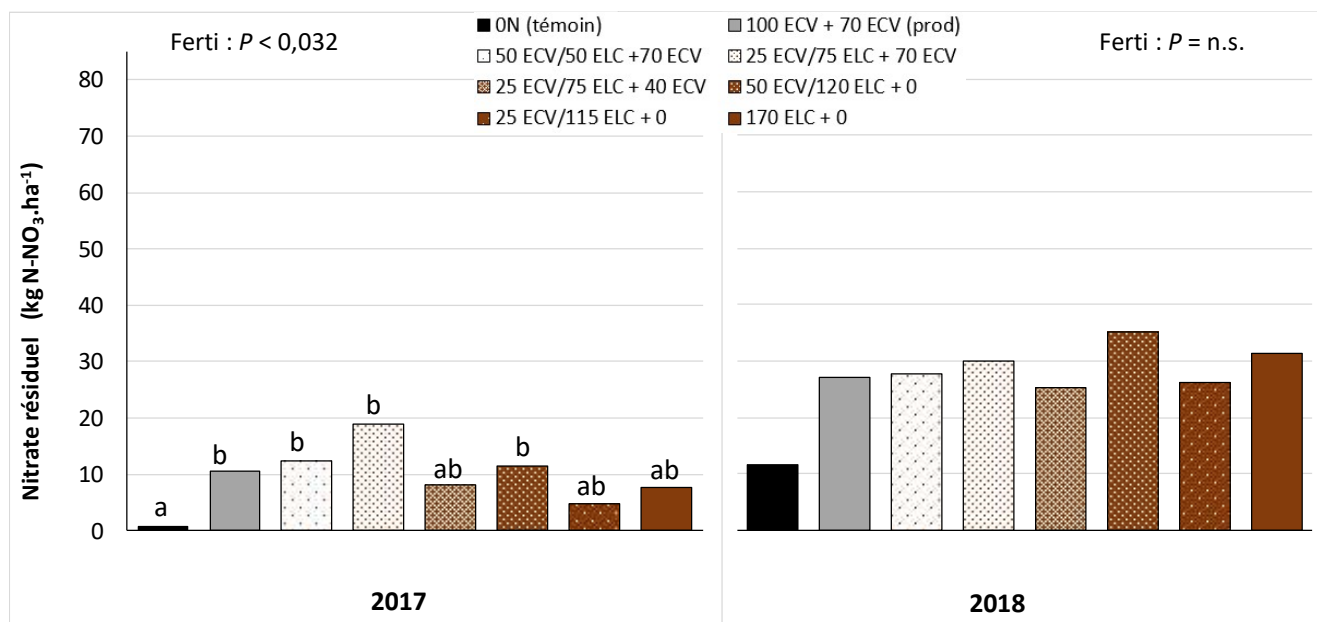


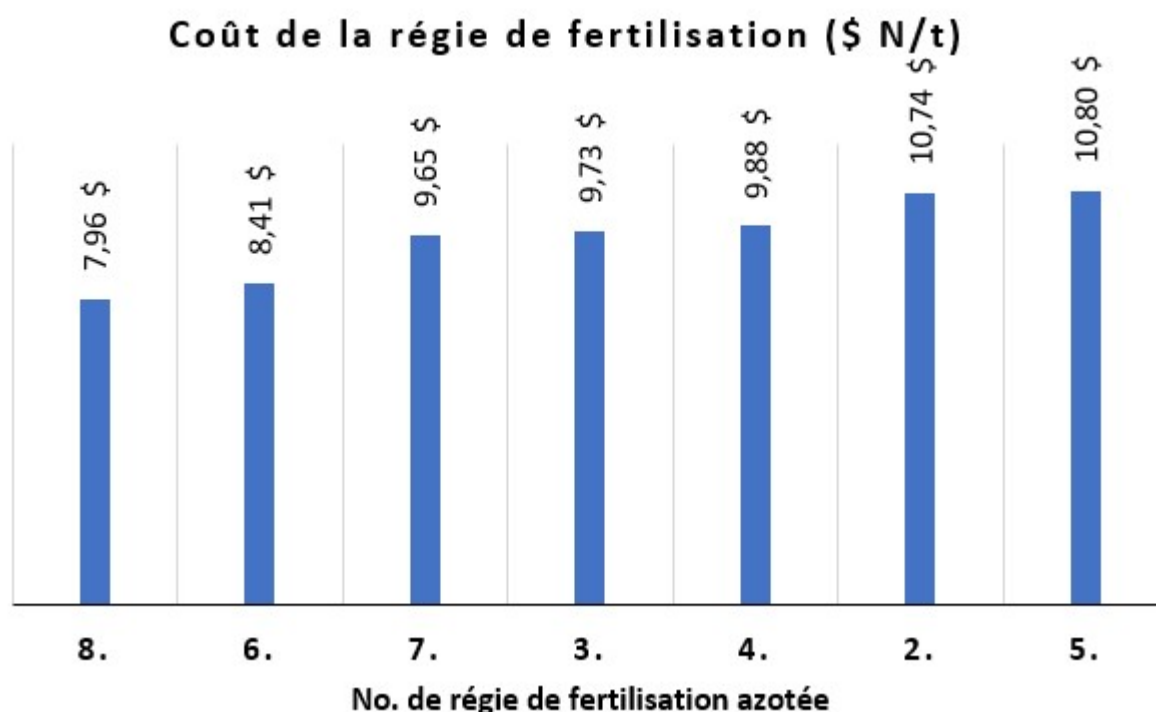
Figure 17. Contenus en nitrate résiduel de la strate 30-60 cm de sol suivant la récolte des pommes de terre, le 5 octobre 2017 et le 9 octobre 2018.

Tableau 7. Potentiel de fourniture en N-NO<sub>3</sub> du sol, mesuré par incubation, suivant la récolte des pommes de terre, le 5 octobre 2017 et 9 octobre 2018.

No.	Traitements	Minéralisation N-NO <sub>3</sub> (10 jrs) kg ha <sup>-1</sup> b.s.
<b>2017</b>		
1	0 N (témoin sans apport de N)	9,8
2	100 ECV + 70 ECV (Producteur)	16,1
4	50 ECV/50 ELC +70 ECV	17,1
5	25 ECV/75 ELC + 40 ECV	13,8
6	25 ECV/75 ELC + 70 ECV	21,1
7	25 ECV/115 ELC + 0	13,3
8	50 ECV/120 ELC + 0	24,8
3	170 ELC + 0	21,1
<b>Valeur de P</b>		<b>0,2261</b>
<b>2018</b>		
1	0 N (témoin sans apport de N)	24,2
2	100 ECV + 70 ECV (Producteur)	22,6
4	50 ECV/50 ELC +70 ECV	23,3
5	25 ECV/75 ELC + 40 ECV	23,9
6	25 ECV/75 ELC + 70 ECV	26,3
7	25 ECV/115 ELC + 0	45,0
8	50 ECV/120 ELC + 0	31,6
3	170 ELC + 0	42,60
<b>Valeurs de P</b>		<b>0,5234</b>

### 3.7 ANALYSE ÉCONOMIQUE

Le coût de la fertilisation par tonne de pomme de terre vendable est présenté à la Figure 18 selon la valeur moyenne pour les deux années. Il en ressort que la régie no.8 (25 ECV/115 ELC + 0), comportant 82 % d'ELC, génère le plus faible coût d'azote par tonne de pomme de terre vendable, soit 7,96 \$. Elle est suivie en 2<sup>e</sup>, avec une bonne différence, de la régie no.6 comportant 54 % d'ELC. À l'opposée, la régie no.5 (25 ECV/75 ELC + 70 ECV), comportant 56 % d'ECV est quant à elle celle qui génère le coût le plus élevé à 10,80 \$ par tonne de pomme de terre vendable. Il est à noter que la régie Producteur (no.2 : 100 ECV + 70 ECV), comportant 100 % d'ECV, présente un coût presque aussi élevé.



**Figure 18. Coût de chaque régie de fertilisation basé sur le prix moyen 2016-2018 des engrais.** Régies no.8 (25 ECV/115 ELC + 0, no.6 (25 ECV/75 ELC + 40 ECV), no.7 (50 ECV/120 ELC + 0), no.3 (170 ELC + 0), no.4 (50 ECV/50 ELC + 70 ECV), no.2 (prod) (100 ECV + 70 ECV) et no.5 (25 ECV/75 ELC + 70 ECV).

Les meilleurs résultats économiques ont donc été obtenus avec une fertilisation de 140N (Régies no.6 et 8), avec une différence de 49 \$ ha<sup>-1</sup>, relativement aux coûts des cinq autres régies (Tableau 9). Dans les régions de la Capitale Nationale et de Lanaudière qui regroupent la majorité (45 %) des superficies de cette production au Québec, la taille moyenne des fermes est de 60 ha (MAPAQ 2014). Ainsi, l'impact économique potentiel pour une ferme de 60 ha est de près de 3 000 \$.

Ce coût inférieur des régies no.6 et 8 a été obtenu pour deux principales raisons. Dans un premier temps, elles sont les seules qui sont basées sur une fertilisation à 140 kg N ha<sup>-1</sup>. Toutes les autres régies reçoivent 30 unités d'azote supplémentaires. Dans un second temps, une grande partie de la fertilisation est faite avec l'engrais ELC. L'ELC a un prix par kg d'azote plus faible (2,11 \$ kg<sup>-1</sup> de N pour 2016-2018) que l'ECV (2,33 \$ kg<sup>-1</sup> de N pour 2016-

2018). Et quelle que soit l'année considérée (Tableau 10), le kilogramme d'azote de l'ELC est toujours moins coûteux que le kilogramme d'azote de l'ECV. Par conséquent, les régies no.6 et 8 sont les meilleures options économiques, tant que le rapport de prix entre les deux engrais ne s'inverse pas.

**Tableau 8. Répartition du coût total de fertilisation selon le type d'engrais**

No.	Coût ECV (\$/ha)	Coût ELC (\$/ha)	Coût total (\$/ha)
T8	58,15 \$	242,26 \$	300,41 \$
T6	151,19 \$	158,00 \$	309,18 \$
T3	- \$	358,13 \$	358,13 \$
T7	116,30 \$	252,80 \$	369,09 \$
T5	220,96 \$	158,00 \$	378,96 \$
T4	279,11 \$	105,33 \$	384,44 \$
T2	395,41 \$	- \$	395,41 \$

**Tableau 9. Répartition du coût total de fertilisation selon le type d'engrais**

Type d'engrais	2016	2017	2018
ECV (\$ t <sup>-1</sup> )	670,00 \$	606,00 \$	608,00 \$
ELC (\$ t <sup>-1</sup> )	965,91 \$	899,86 \$	915,00 \$

**Tableau 10. Classement des différentes régies de fertilisation selon le rendement vendable obtenu**

No. Régies à l'essai	Description	Rendement vendable moyen (t/ha)
T4	50 ECV/50 ELC +70 ECV	38,91 \$
T7	25 ECV/115 ELC + 0	38,24 \$
T8	50 ECV/120 ELC + 0	37,73 \$
T2	100 ECV + 70 ECV (Producteur)	36,82 \$
T3	170 ELC + 0	36,81 \$
T6	25 ECV/75 ELC + 70 ECV	36,76 \$
T5	25 ECV/75 ELC + 40 ECV	35,10 \$

Cette analyse s'est concentrée sur le potentiel de rentabilité de différentes stratégies de fertilisation sur la base seulement de l'efficacité productive de deux types de fertilisants azotés, soit l'ECV (27-0-0) et l'ELC (44-0-0). Ces deux types d'engrais sont passablement différents dans leurs caractéristiques physiques. Ces différences de caractéristiques pourraient engendrer des coûts reliés à la logistique des engrais. Ainsi, la nécessité de mélanger ou non les deux types d'engrais, à la plantation et/ou au fractionnement aurait un impact sur les coûts de transport et de mélange, voire sur les coûts de gestion. Afin que l'utilisation des ELC demeure avantageuse, ces coûts additionnels ne devraient pas excéder l'économie de coûts de fertilisants qu'ils procurent. Aussi, dans une analyse de faisabilité complète, les coûts de logistique et de gestion devraient être considérés. Cela dit, sur la seule base de l'efficacité de production des stratégies de fertilisation mises à l'essai, le type ELC procure des gains économiques substantiels.

## CONCLUSION

Cette étude menée dans la région de Deschambault a permis de tester le potentiel d'utilisation du FRN (44-0-0), un engrais à libération contrôlée (ELC), dans la culture de la pomme de terre, en comparaison de l'engrais conventionnel (ECV) CAN (27-0-0). Elle visait à tester si l'utilisation de l'ELC, peu sensible au lessivage, permet de hausser le taux d'utilisation du N (TUN) des engrais et de stabiliser les rendements lors d'années pluvieuses ou sous conditions d'irrigation importante. Les régies testées comportaient de l'ECV, de l'ELC ou une combinaison des deux à la plantation, suivi ou non d'un apport au fractionnement sous forme d'ECV. La plupart apportaient au total 170 kg N ha<sup>-1</sup>, mais deux régies testaient une dose moindre à 140 kg N ha<sup>-1</sup>. La régie témoin Producteur apportait 100 kg N ECV ha<sup>-1</sup> à la plantation, suivi de 70 kg N ECV ha<sup>-1</sup> au fractionnement. Lors d'une année présentant un début de saison plus froid que la normale (2017), ce sont les régies apportant au moins 50 kg N ECV ha<sup>-1</sup> qui ont permis les meilleures teneurs en nitrate dans le mois suivant la plantation (26 JAP), du double de celles des autres régies (< 25 kg N ha<sup>-1</sup>). Toutefois, un apport de 100 kg N ECV ha<sup>-1</sup> n'apportait pas de gain supplémentaire à la dose de 50 kg N ha<sup>-1</sup>. De plus, l'ELC, même apporté en très grandes quantités (170 kg N ELC ha<sup>-1</sup>) n'a pas permis d'obtenir des charges équivalentes. Juste avant le fractionnement (42 JAP), la mesure de charges de nitrate trois fois plus élevées dans les sols ayant reçu de l'ELC que dans le sol témoin Producteur est venu appuyer l'hypothèse que l'ELC a connu un délai de libération dans les premières semaines, puis a relargué son azote. Cependant, ce délai de fourniture en N ne s'est pas traduit par des pertes de rendement. En fait, le type de régie n'a eu aucun impact sur les rendements vendables. En 2018, année présentant un printemps favorable au développement des cultures, tant la régie Producteur, que celles apportant 100 % du N sous forme d'ELC tout à la plantation ont permis d'atteindre les plus fortes disponibilités en nitrate dans le mois suivant la plantation. Au fractionnement, aucune différence de disponibilité en N selon les régies n'a non plus été mesurée. Lors de la récolte, des rendements au moins équivalents à celui du témoin Producteur ont été atteints avec toutes les régies. Cependant, ce sont les régies contenant une part d'ELC au démarreur qui ont le mieux performé, incluant deux régies sans fractionnement, dont une apportant une dose totale réduite de N (140 kg N ELC ha<sup>-1</sup>). Les TUN atteints les deux années (66% - 86 %) ont été particulièrement hauts, bien au-delà de la moyenne (45 %) pour le Québec. Si la régie Producteur a permis un des TUN les plus haut en 2017 (89 %), il a cependant produit un des pires en 2018 (66 %), année où la culture a été beaucoup plus irriguée. En fait, deux régies produisent des TUN dans les plus élevés (> 84 %) les deux saisons. Elles comportent toutes les deux une part d'ELC (29 % et 54 %) et un fractionnement. En conclusion, une régie combinant 50 kg N ECV ha<sup>-1</sup> et 50 kg N ELC ha<sup>-1</sup> au démarreur, suivi d'un apport de 70 kg N ECV ha<sup>-1</sup> au fractionnement apparaît comme une bonne stratégie de fertilisation. Elle a permis de produire autant que la régie Producteur en 2017 et davantage en 2018, et cela dans un sol très dépendant des apports azotés, avec d'excellents TUN les deux années. Elle permet donc de stabiliser les rendements sans laisser plus de nitrate résiduel post-récolte que la régie Producteur. Une baisse de 20 % de la dose de N semble même envisageable puisque les régies avec ELC à dose réduite ont donné, les deux années, d'aussi bons rendements que la régie Producteur. D'autres régies apportant la majorité du N (plus 70%) sous forme d'ELC, sans fractionnement, ont aussi permis de produire autant ou plus de rendement que la régie Producteur, dont une avec une dose réduite à 140 kg N ha<sup>-1</sup>. Elles sont aussi dans les moins coûteuses. Toutefois, des essais supplémentaires sont nécessaires pour s'assurer que ces régies, très différentes de l'usage courant, performant bien sur plusieurs années.

## RÉFÉRENCES

- ACIA.** 2015. *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] <https://www.inspection.gc.ca/salubrite-alimentaire-pour-l-industrie/directives-archivees-sur-les-aliments/fruits-et-legumes-frais/inspection-de-la-qualite/manuels-d-inspection-des-legumes-frais/pommes-de-terre/fra/1387374793841/1387374861996?chap=2> (consultée en 2015).
- Agriculture Victoria.** 2010. Potatoes: Factors affecting dry matter. Note number AG0323. Victoria State Government. [En ligne] <http://agriculture.vic.gov.au/agriculture/horticulture/vegetables/vegetables-a-z/potatoes/potatoes-factors-affecting-dry-matter> (consultée en janvier 2020).
- Bergeron, D.** 2012. L'irrigation de la pomme de terre au Québec : état de la situation et tendances. Présenté lors du Colloque sur la pomme de terre, 23 novembre 2012, Lévis, Québec.
- Bergeron et coll.** 2018. Guide technique – Gestion raisonnée de l'irrigation. CRAAQ. 320 p.
- Bero et coll.** 2014. Controlled-release fertilizer effect on potato and groundwater nitrogen in sandy soil. *Agron. J.* 106:359–368.
- BPR.** 2003. Analyse des questions d'approvisionnement en eau pour le secteur de l'agriculture, PAECQ, Rapport final. 68 p.
- Boivin, C. et C. Landry.** 2010. Impact du pilotage raisonné de l'irrigation sur l'efficacité fertilisante azotée et le rendement en pomme de terre. Rapport final CDAQ, projet #6374, 34 p.
- Boivin, C. et C. Landry.** 2011. Impact du pilotage raisonné de l'irrigation sur l'efficacité fertilisante azotée et le rendement en pomme de terre. Rapport final CDAQ no. 6374. IRDA, 71 pages.
- Bourbonnais, C.,** Coop fédérée. Communication personnelle, février 2019.
- Cambouris et coll.** 2015. Potato Response to Nitrogen Sources and Rates in an Irrigated Sandy Soil. *Agron. J.* 108:391-401.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ).** 2010. Guide de référence en fertilisation du Québec, 2e édition. CRAAQ, Québec, 473 p.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ).** 2018. Fertilisants et amendements-Prix (AGDEX 540/855). CRAAQ, Québec, 1 page.
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ).** 2019. Références économiques-AGDEX 250/821h. Pommes de terre de table – budget variétés tardives.
- 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.



**Errebhi et coll.** 1998. Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management. *Agron. J.* 90: 10-15.

**Financière agricole du Québec.** 2019. État des cultures 2017. [En ligne] <https://www.fadq.qc.ca/salle-de-presse/bulletins-dinformation/etat-des-cultures/2017/> (consultée en 2019).

**Financière agricole du Québec.** 2019. État des cultures 2018. État des cultures au Québec, rapports numéro 6 et 7. [En ligne] <https://www.fadq.qc.ca/salle-de-presse/bulletins-dinformation/etat-des-cultures/2018/> (consultée en 2019).

**Fox, R.H. et W.P. Piekielek.** 1978. A rapid method for estimating the nitrogen supplying capability of a soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:743-747.

**Gandeza et coll.** 1991. Simulation of crop response to polyolefin-coated urea: I. Field dissolution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1462–1467.

**Gasser et coll.** 2002. Impact of potato-cereal rotations 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 edition. Madison, WI.

**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.

**Giroux et Sarrasin.** 2011. Pesticides et nitrates dans l'eau souterraine près de cultures de pommes de terre - Échantillonnage dans quelques régions du Québec en 2008 et 2009, MDDEP, 31 p.

**Institut de la statistique du Québec (ISQ).** 2019. *Superficie, production, ventes hors secteur et recettes monétaires de la pomme de terre, par région administrative, Québec.* [En ligne] <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/pommes-terre/pommes-terre-prod-ventes-regions.html#an=2018> (consultée en janvier 2020).

**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.

**Juma, N., E.A. Paul et B. Mary.** 1984. Kinetic Analysis of Net Nitrogen Mineralization in Soil. *Soil Science Society of America Journal - SSSAJ.* 48. 753-757. 10.2136/sssaj1984.03615995004800040011x.

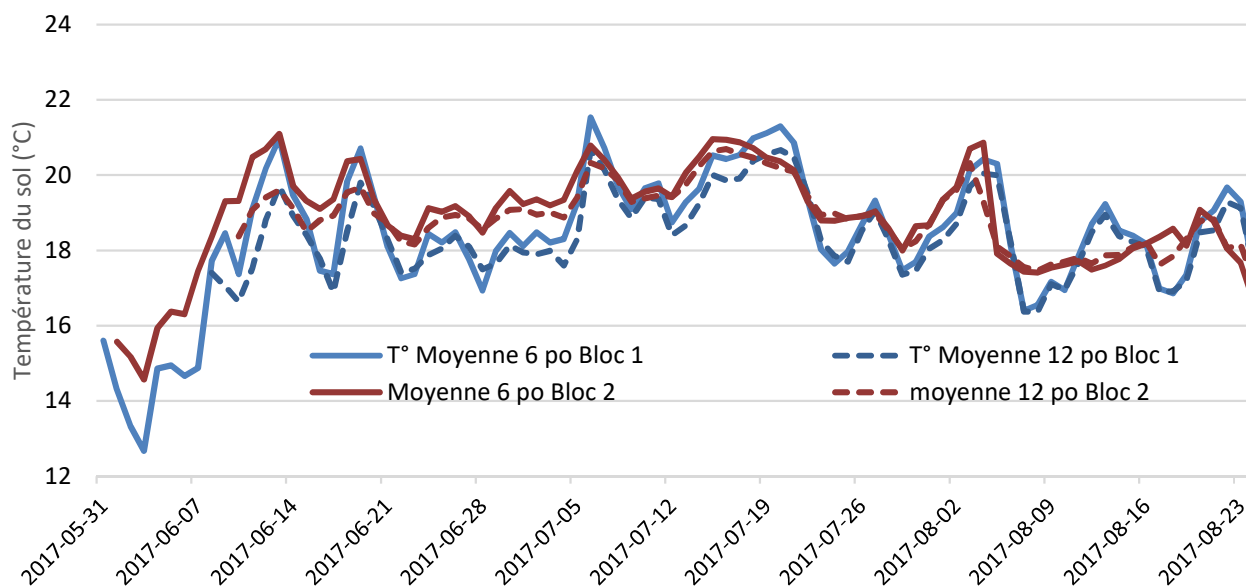
**Labrie.** 2015. L'azote à libération contrôlée FRN. *Le Coopérateur*, avril 2015, Vol. 44(4).

**Landry, C. et C. Boivin.** 2013. Engrais à libération contrôlée : potentiel d'utilisation dans la pomme de terre irriguée. Rapport final PSIH no. 11-1-546, 57 pages.

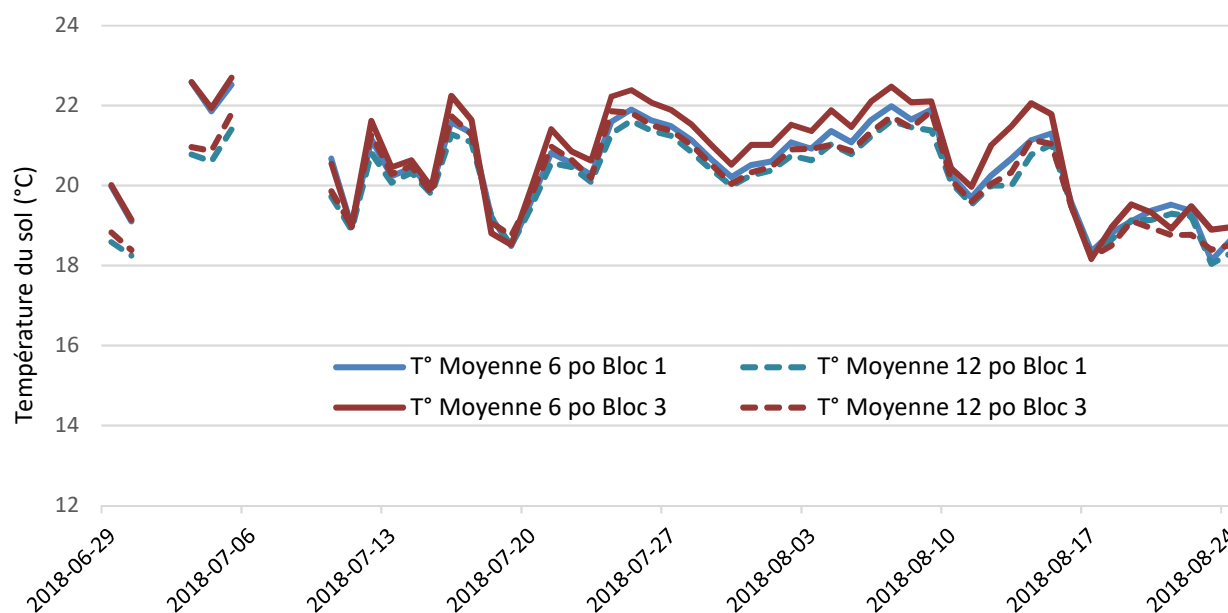
**Landry, C. et C. Boivin.** 2014. Relations entre les nutriments minérale et hydrique: impacts sur la productivité de la pomme de terre et l'utilisation des engrais azotés. Rapport final CDAQ #6592, 53 pages.

- Littell, R.C., G.A. Milliken, W.W. Stroup, R.D. Wolfinger et O. Schabengerger.** 2006. SAS. System for Mixed Models, second edition. Cary, NC : SAS Institute inc.
- Milburn et coll.** 1990. Nitrate leaching from systematically tiled potato fields in New Brunswick, Canada. J. Environ. Qual. 19: 448-454.
- Ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation du Québec (MAPAQ)** - Direction du développement des secteurs agroalimentaires. 2014. Monographie de l’industrie de la pomme de terre au Québec. 80p.
- N’Dayegamiye et coll.** 2010. Rapport final CDAQ # 6177, 28p.  
Producteurs de pommes de terre du Québec (PPTQ). 2015. [En ligne]. <http://www.pptq.ca/bienvenue.htm> (consultée en 2015).
- 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. et R.R. Simard.** 1993. Mehlich III-extractable elements. p. 43-49. In M.R. Carter (ed.) Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publ., CRC Press, Boca Ration, FL.
- Tremblay et coll.** 2012. Agr. J. 104:1658-1671.
- Shoji et coll.** 2001. Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 32:1051–1070.
- Wilson et coll.** 2009. Potato response to a polymer-coated urea on an irrigated, coarse-textured soil. Agron. J. 101:897–905.
- Wilson et coll.** 2010. Effects of Polymer-coated Urea on Nitrate Leaching and Nitrogen Uptake by Potato. J. Environ. Qual. 39:492–499.
- Zebarth et Rosen.** 2007. Research perspective on nitrogen BMP development for potato. Am. J. Potato Res. 84:3-18.
- Zebarth et coll.** 2012. Controlled release fertilizer product effects on potato crop response and nitrous oxide emissions under rain-fed production on a medium-textured soil. Can. J. Soil Sci. 92:759–769.
- Ziadi et coll.** 2007. Utilisation des engrais minéraux azotés en grandes cultures : description des différentes formes et leurs impacts en agroenvironnement. Texte de conférence Colloque azote, CRAAQ - OAQ, 28 mars 2007, Drummondville.
- Ziadi et coll.** 2011. Efficiency of controlled release nitrogen in potato production in eastern Canada. Agron. J. 103:60–66.
- Zvomuya et coll.** 2003. Nitrate leaching and nitrogen recovery following application of polyolefin-coated urea to potato. J. Environ. Qual. 32:480–489.

## ANNEXE A

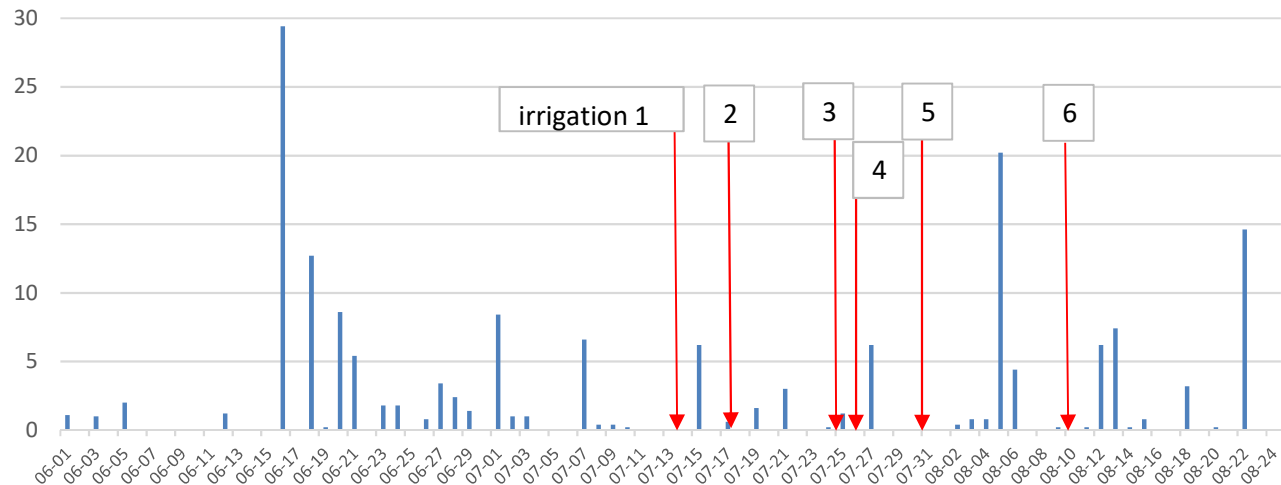


**Annexe 1. Suivi des T° moyennes du sol à 15 et 30 cm par les sondes installées dans les traitements avec engrais ELC des blocs 1 et 2 du site d'étude, saison 2017.**



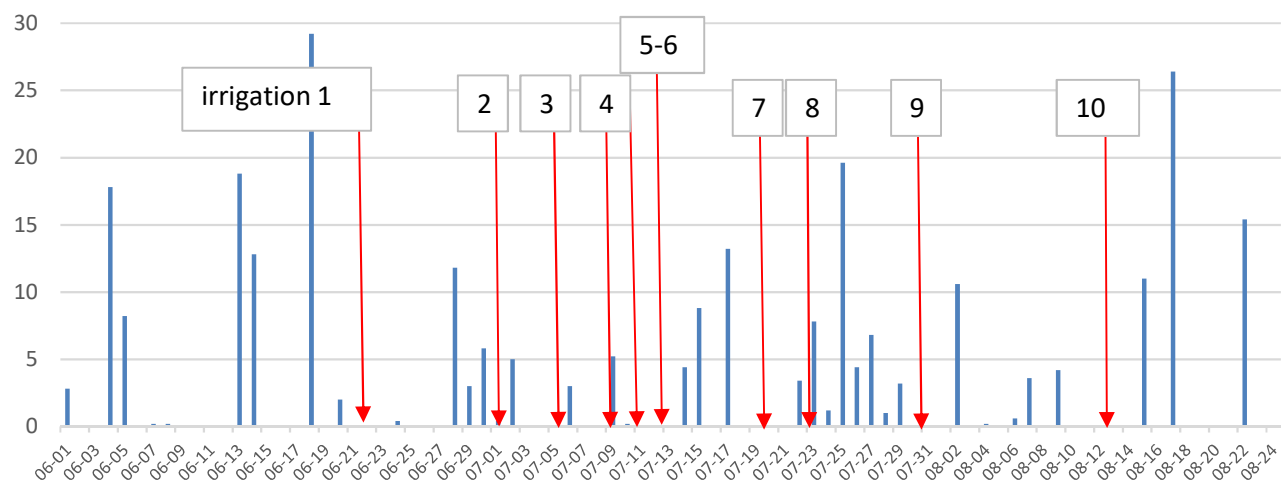
**Annexe 2. Suivi des T° moyennes du sol à 15 et 30 cm par les sondes installées dans les traitements avec engrais ELC des blocs 1 et 3 du site d'étude, saison 2018.**

PRÉCIPITATIONS (mm) 2017 + irrigations

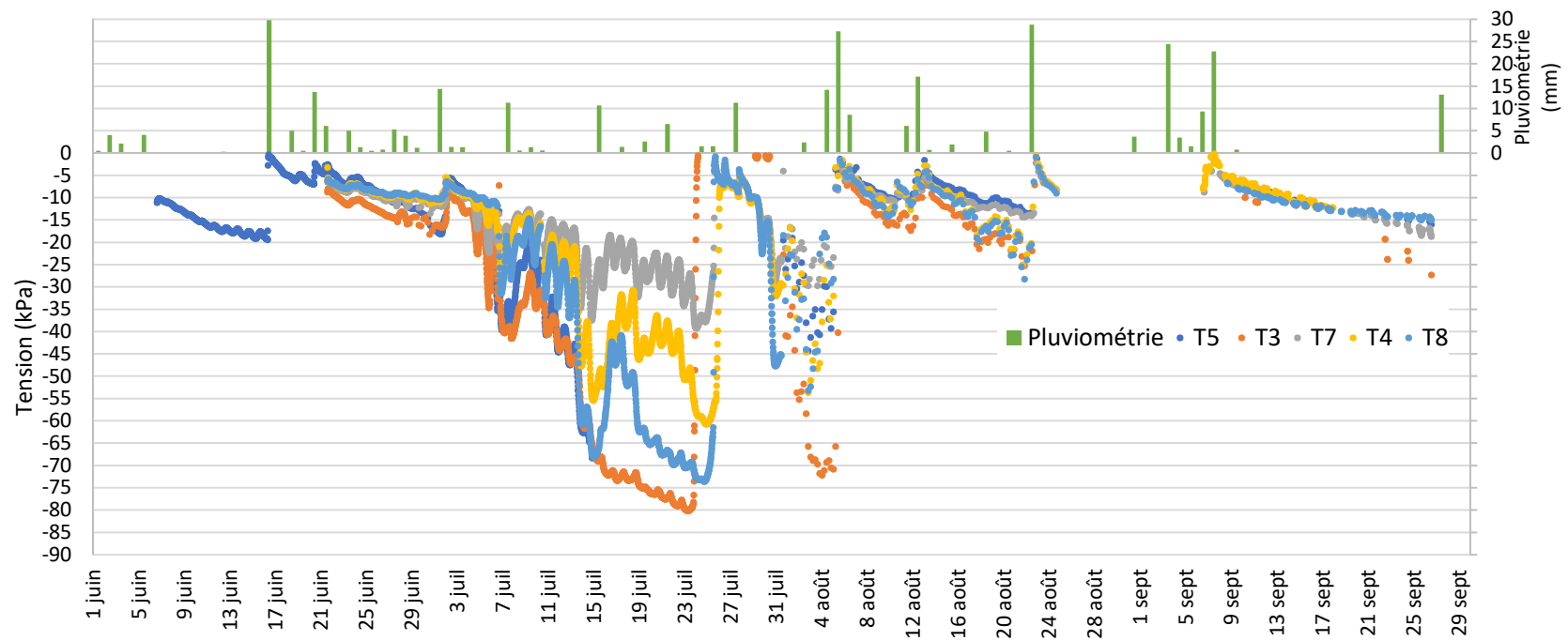


Annexe 3. Irrigations effectuées dans le dispositif expérimental, saison 2017.

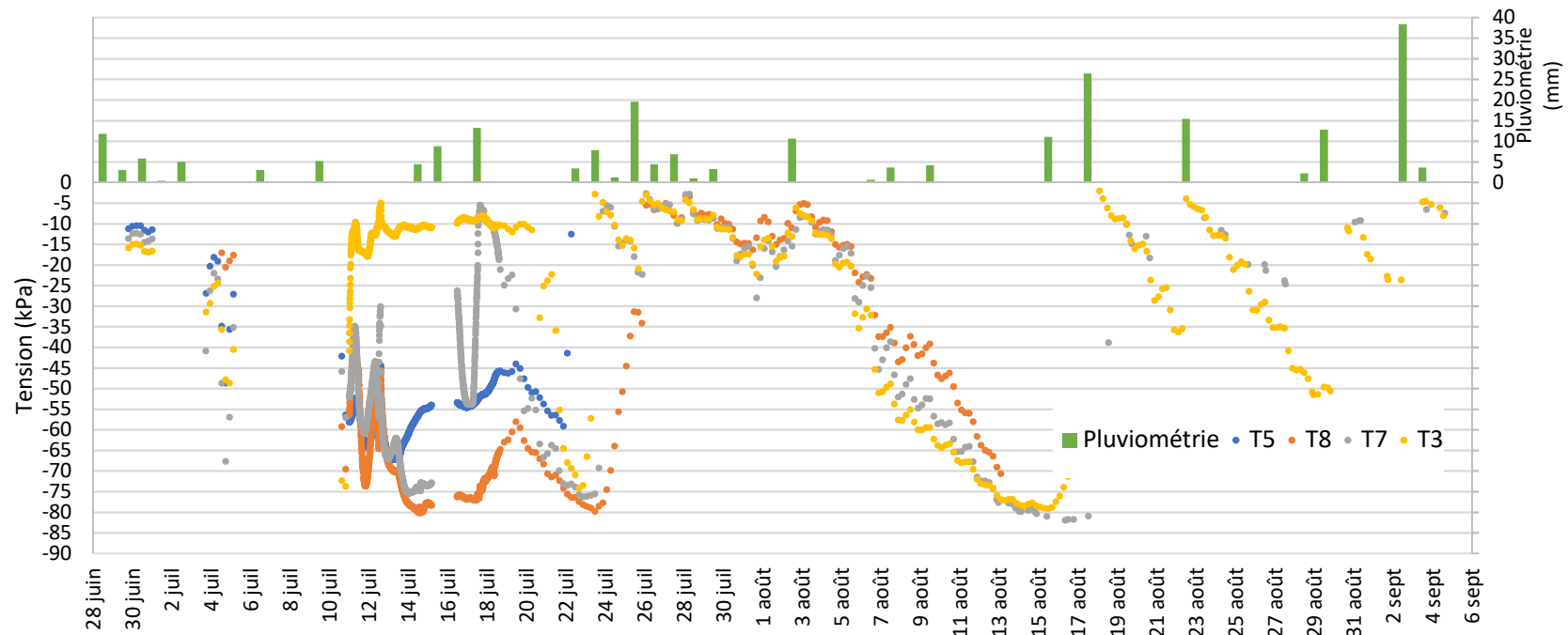
PRÉCIPITATIONS (mm) 2018 + irrigations



Annexe 4. Irrigations effectuées dans le dispositif expérimental, saison 2018.



**Annexe 5. Suivi tensiométrique (tension en kPa) et pluviométrie (mm) dans le bloc 1 du dispositif expérimental, saison 2017**



**Annexe 6. Suivi tensiométrique (tension en kPa) et pluviométrie (mm) dans le bloc 3 du dispositif expérimental, saison 2018.**

