



Rapport final

Irrigation de la pomme de terre sous une gestion locale et globale en lien avec les rendements et la perte des nitrates

Projet no. 6183

Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec (SPPTEQ)
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)



Mars 2008 à mars 2011

Rapport rédigé par

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

Avril 2012

Équipe de réalisation

FERME VICTORIN DROLET

Victorin Drolet	Producteur
Norbert Drolet	Producteur

SYNDICAT DES PRODUCTEURS DE POMMES DE TERRE DE LA RÉGION DE QUÉBEC (SPPTRQ)

Martin Méthot	Secrétaire du SPPTRQ
---------------	----------------------

IRDA

Carl Boivin	Chercheur
Christine Landry	Chercheure
Paul Deschênes	Professionnel de recherche
Julie Mainguy	Professionnelle de recherche
Laurence Simard	Attachée de recherche
Stéphane Nadon	Technicien agricole
Michèle Grenier	Statisticienne
Rémi Carrier	Technicien agricole
Aline Germain	Technicienne agricole
Danièle Pagé	Technicienne agricole
Michel Atkins	Technicien agricole

MAPAQ DRCN

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

MAPAQ DRBSL

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

Table des matières

1	SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS	6
2	DESCRIPTION DU PROJET.....	8
2.1	Introduction	8
2.2	Objectif général	10
2.3	Objectifs spécifiques	10
3	MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	11
3.1	Site expérimental.....	11
3.2	Matériel végétal et régie de culture	13
3.3	Types de gestion de l'irrigation comparés	13
3.4	Collecte des données	15
3.4.1	Caractérisation du site	15
3.4.2	Conditions météorologiques	15
3.4.3	Tension de l'eau du sol	15
3.4.4	Suivi du lessivage des nitrates dans le sol et prélèvement en azote par la culture	16
3.4.5	Récolte et classement des tubercules	16
4	RÉSULTATS ET ANALYSE	18
4.1	Résultats obtenus et analyse en fonction des objectifs spécifiques.....	18
4.1.1	Diminuer les pertes en nitrates par lessivage en prenant en compte la variabilité de la teneur en eau au champ, par la gestion locale de l'irrigation	18
4.1.2	Étudier l'impact possible des deux modes de gestion de l'irrigation sur les maladies importantes de la pomme de terre comme la gale, la rhizoctonie et le mildiou	28
4.1.3	Augmenter les rendements commercialisables dans la production de la pomme de terre	31
4.1.4	Améliorer l'efficacité du rapport volume d'eau appliqué/kg de pomme de terre produit grâce à une gestion locale de l'irrigation	34
4.1.5	Déterminer la faisabilité économique d'une gestion locale de l'irrigation	37
4.2	Diffusion des résultats	39
5	CONCLUSION.....	41
6	REMERCIEMENTS.....	42
7	BIBLIOGRAPHIE.....	43
8	ANNEXE	44
8.1	Photos	44
8.2	Rapport du projet réalisé en 2007	47

Liste des figures

Figure 1. Carte satellite du champ à l'étude où les sites de mesures de la tension de l'eau dans le sol sont indiqués par un point jaune.....	12
Figure 2. Emplacement des différentes zones de suivis dans le champ à l'étude.....	14
Figure 3. Teneurs en nitrates au travers du profil de sol en cours de saison, été 2008.....	20
Figure 4. Teneurs en nitrates au travers du profil de sol en cours de saison, été 2010.....	21
Figure 5. Distribution des teneurs en nitrates mesurées en 2008 et 2010 dans la strate 0-30 cm de sol. N.B. Les valeurs d'échelle des légendes sont différentes les deux années.....	23
Figure 6. Distribution des teneurs en nitrates mesurées en 2008 et 2010 dans la strate 30-60 cm de sol. N.B. Les valeurs d'échelle des légendes sont différentes les deux années.....	24
Figure 7. Distribution des teneurs en nitrates mesurées en 2008 et 2010 dans la strate 60-90 cm de sol. N.B. Les valeurs d'échelle des légendes sont différentes les deux années.....	25
Figure 8. Distribution de l'indice de gale mesurée en 2008 (A) et 2010 (B).	29
Figure 9. Distribution de l'indice de rhizoctonie en 2008 (A) et 2010 (B).	30
Figure 10. Distribution des rendements totaux (A) et vendables (B) en 2008 (t/ha).....	32
Figure 11. Distribution des rendements totaux (A) et vendables (B) en 2010 (t/ha).....	33
Figure 12. Précipitations mesurées (mm) sur le site entre le 1 ^{er} mai et le 28 octobre 2008.	35
Figure 13. Précipitations mesurées (mm) sur le site entre le 1 ^{er} mai et le 28 octobre 2010.	36
Figure 14. État de la culture au 14 juillet 2008.....	44
Figure 15. La rampe d'irrigation et l'enrouleur (25 août 2008).	44
Figure 16. Échantillonnage de sol le 19 septembre 2008.	45
Figure 17. Échantillonnage de sol le 19 septembre 2008.	46

Liste des tableaux

Tableau 1. Historique des différentes opérations culturales.	13
Tableau 2. Hauteur d'eau appliquée par l'irrigation selon le type de gestion et le statut hydrique du sol au moment de commencer un cycle d'irrigation.....	14
Tableau 3. Coefficient de corrélation (r) de Pearson entre la teneur en nitrates moyenne des zones de mesure pour certaines dates cibles et la tension de l'eau en période « humide » dans le sol pour la saison 2010.....	26
Tableau 4. Coefficient de corrélation (r) de Pearson entre la teneur moyenne en nitrates du sol (0-30 cm) des zones de mesure et les rendements totaux et vendables produits en 2008 et 2009.....	27
Tableau 5. Prélèvements et exportation en azote mesurés dans les 4 zones d'étude en 2008 et 2010.....	27
Tableau 6. Indices de gale et de rhizoctonie mesurés sur les tubercules récoltés aux sites de mesure.	28
Tableau 7. Rendement total et vendable en tubercules (t/ha) pour 2008 et 2010.....	31
Tableau 8. Litres d'eau utilisés par kg de tubercules récoltés selon le type de gestion....	34
Tableau 9. Durée d'un épisode d'irrigation selon la hauteur d'eau appliquée pour 1000 mètres linéaires de champ avec une rampe ayant une portée de 100 mètres latéralement (10 ha).....	37

1 SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS

Ce projet s'articule autour des conclusions d'un premier¹ réalisé en 2007 où l'objectif était de vérifier l'existence de patrons d'assèchement ou d'humidité dans un sol agricole en production de pommes de terre irriguées et de relier ces patrons aux rendements et aux mouvements des nitrates dans le profil de sol. Les résultats de ce projet révèlent la présence de structures spatiales constantes dans les patrons d'humidité du sol et ont relié ces derniers aux rendements vendables.

En ce qui a trait à la présente étude, la gestion de l'irrigation était effectuée selon deux approches, soit l'une globale où la hauteur d'eau appliquée est la même pour l'ensemble du champ et la seconde dite locale. Pour ce faire, le champ à l'étude en 2007 a été subdivisé en deux, longitudinalement, afin de comparer les approches. Une rampe d'irrigation à taux variable a été utilisée afin de considérer la variation du statut hydrique du sol conséquente aux patrons observés dans les zones du champ sous gestion locale.

Réalisé en collaboration avec des intervenants du Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec, de l'IRDA, du MAPAQ de la Direction régionale de la Capitale-Nationale, d'HORTAU et de Dubois Agrinovation, ce projet s'est déroulé à la Ferme Victorin Drolet située à Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (Québec).

Les interventions réalisées dans ce projet pour tenir compte des patrons d'humidité dans la gestion des apports en eau par l'irrigation n'ont pas permis de diminuer le lessivage des nitrates. Les mesures de prélèvements en azote (N) de la culture, de la teneur en nitrates du sol et de son suivi au travers du profil de sol indiquent toutefois que les conditions hydriques du sol ont influencé le devenir du N. Ce constat s'applique également aux rendements où la productivité des zones de sol humides n'a pas été augmentée par une gestion locale de l'irrigation.

Toutefois, l'approche locale, sans porter préjudice aux rendements, a utilisé moins d'eau par épisode d'irrigation. En termes de hauteur d'eau moyenne par épisode, la gestion globale apportait 19 mm et la gestion locale, respectivement, 15,5 et 17,1 mm en 2008 et 2010. Avec la rampe utilisée, dont la portée latérale est de 100 m, il fallait alors 33 heures pour apporter les 19 mm sur un champ de 1000 mètres linéaires (10 ha). À titre comparatif, ce nombre d'heures diminue à 29 pour l'application de 16 mm. Conséquemment, davantage de superficies peuvent bénéficier de l'irrigation sans devoir pour autant augmenter le temps de pompage ou acquérir une rampe supplémentaire, car la hauteur d'eau appliquée est fonction de la vitesse d'avancement de la rampe.

Cependant, tenir compte des patrons d'humidité requiert des équipements de mesure du statut hydrique du sol tels que des tensiomètres. Dans l'étude réalisée en 2007, le nombre

¹ Projet no. 5218 – « Étude d'acquisition de connaissances sur la détermination de l'existence de patrons éventuels d'assèchement ou d'humidité dans un sol agricole en relation avec le rendement en pommes de terre et la perte des nitrates ».

de tensiomètres nécessaire pour être en mesure de considérer les patrons d'humidité de façon efficace était d'un par hectare. Il est plus facile de justifier ces investissements dans des cultures telles que la fraise où les revenus par unité de surface sont beaucoup plus élevés. Toutefois, la distribution des patrons est constante dans le temps. Ainsi, même si le statut hydrique du sol varie, une fois la distribution des patrons caractérisée adéquatement, seulement quelques tensiomètres pourraient être utilisés dans des zones ciblées afin d'orienter la hauteur d'eau à appliquer.

2 DESCRIPTION DU PROJET

2.1 Introduction

Ce projet s'articule autour des conclusions d'une première étude² réalisée en 2007 où l'objectif était de vérifier l'existence de patrons d'assèchement ou d'humidité dans un sol agricole en production de pommes de terre irriguées et de relier ces patrons aux rendements et aux mouvements des nitrates dans le profil de sol. Les résultats de ce projet ont permis de confirmer la présence de structure spatiale constante dans les patrons d'humidité du sol.

L'analyse des patrons dans le temps a permis, dans un premier temps, d'évaluer la portée ou l'étendue des zones semblables, c'est-à-dire, là où la tension de l'eau dans le sol est comparable. En conditions plus sèches de sol, les zones qui se ressemblent sont à l'intérieur d'un rayon plus grand qu'en conditions de sol humides, soit respectivement 400 et 200 m. Pour expliquer la présence de ces patrons, la texture du sol, le taux de matière organique et la topographie du terrain ont été mis en relation avec les mesures de tension de l'eau dans le sol effectuées à différentes périodes de la saison. Parmi ces variables, la relation entre la tension de l'eau dans le sol et la proportion de sable et d'argile dans le sol s'est avérée significative, soit un coefficient de corrélation (r) de 0,381 pour le sable ($p = 0,038$) et de 0,344 pour l'argile ($p = 0,063$). Concrètement, pour la période dite sèche, plus la proportion de sable est importante dans une zone donnée, plus la tension de l'eau dans le sol est élevée (sec) et plus la tension est basse (humide) dans les zones où il y a davantage d'argile.

La connaissance de l'étendue de ces zones a été utile pour évaluer le nombre de tensiomètres requis pour détecter un stress hydrique avec une précision donnée. Cependant, il était impératif de connaître les rendements en tubercules afin de déterminer si ces derniers étaient en relation avec les patrons observés. Les analyses statistiques effectuées ont révélé qu'il existait une relation significative entre les rendements vendables et les patrons d'humidité, soit un coefficient de corrélation (r) de 0,373 ($p = 0,042$) pour l'ensemble du champ et un coefficient atteignant un sommet de 0,61 ($p = 0,06$) pour la zone représentée par les sites T1 à T10 (Figure 1). À partir de ces résultats, il a été possible d'estimer la perte de rendements liée à une variation de la tension de l'eau dans le sol. En effet, la chute d'une unité de tension (1 kPa), c'est-à-dire, des conditions d'humidité de sol qui augmente, est corrélée avec une diminution de rendement de 3,3 t/ha. Donc, pour détecter un stress hydrique avec une précision de 5 et 10 %, le nombre de tensiomètres à utiliser pour ce champ est respectivement de 4 et 5 unités pour une superficie de 4 ha.

² Projet no. 5218 – « Étude d'acquisition de connaissances sur la détermination de l'existence de patrons éventuels d'assèchement ou d'humidité dans un sol agricole en relation avec le rendement en pommes de terre et la perte des nitrates ».

Ce projet s'inscrivait également dans une démarche qui visait une utilisation optimale de l'eau et conséquemment, des fertilisants par la plante. C'est pourquoi un des objectifs était de vérifier s'il existe un lien entre les patrons d'humidité et la descente des nitrates au travers du profil du sol par lessivage. À prime abord, bien qu'aucune tendance générale ne se soit dessinée pour l'ensemble des cinq périodes couvertes par le suivi des nitrates dans le sol, en juin et juillet, alors que la croissance des plants est très active, l'emplacement dans le champ semble avoir été déterminant. En effet, les teneurs en nitrates de la zone utile (0-30 cm) de sol étaient jusqu'à 1,8 fois plus élevées dans la partie dite haute du champ (500-1000 m), que dans la partie basse (50-500 m). Par ailleurs, l'étude du patron général de distribution des teneurs de nitrates au travers du profil en fonction du temps a permis de bien faire ressortir la hausse des teneurs en nitrates en juin et juillet dans la couche de surface (0-30 cm) du sol, suivi quelques semaines plus tard, d'une hausse de la descente des nitrates dans la strate subséquente (30-60 cm) de sol.

Par ailleurs, la vérification de l'existence d'une relation entre les zones de variabilité de l'humidité du sol et la qualité des tubercules a permis d'établir un lien entre l'humidité du sol et l'incidence de la gale. La présence de cette relation, en plus de celle entre les patrons d'humidité et le rendement vendable, laissait envisager un impact économique positif de la gestion de l'eau selon les patrons existants par l'uniformisation de l'humidité du sol à l'échelle du champ.

En ce qui a trait à la présente étude, alimentée par les résultats obtenus précédemment, la gestion de l'irrigation a été effectuée selon deux approches, soit l'une globale et la seconde dite locale. En effet, le champ à l'étude en 2007 a été séparé en deux sections, longitudinalement, afin de comparer ces deux approches en ce qui a trait aux rendements et la perte des nitrates. Une rampe d'irrigation permettant l'application d'eau à taux variable a été utilisée. C'est pourquoi l'acquisition de connaissances reliée aux caractéristiques physiques du sol était nécessaire en 2007. Conséquemment, les courbes de conductivité hydraulique non saturée et celles de rétention en eau ont été établies à partir des échantillons prélevés aux 30 sites identifiés à la Figure 1. À partir de ces données, il a été possible d'estimer la réserve facilement utilisable en eau (RFU) moyenne pour ce champ qui est de 8 mm d'eau pour une profondeur de 40 cm de sol. Ainsi, lorsque l'irrigation est déclenchée au point de flétrissement temporaire (pft), qui est d'environ 7,5 kPa en moyenne pour ce champ, les 40 premiers centimètres de sol sont en mesure de retenir 8 mm d'eau. Théoriquement, tout apport supérieur à 8 mm est lessivé en profondeur et inaccessible pour les racines. De plus, la teneur moyenne en air de ce sol est de 29 %, indiquant que les diminutions de rendement observées en 2007 dans certaines parties du champ n'étaient pas dues à un problème de structure, mais plutôt à un excès d'humidité conséquent à un apport excédentaire d'eau par la pluie et l'irrigation.

2.2 Objectif général

Ce projet vise à comparer l'impact d'une gestion de l'irrigation locale qui prend en compte les différents volumes d'eau à appliquer en fonction des diverses valeurs du patron de distribution des teneurs en eau du sol à celui d'une gestion globale appliquant la même quantité d'eau à l'échelle du champ, mais selon une seule valeur tensiométrique, sur le rendement en pommes de terre, le lessivage des nitrates, l'utilisation de l'eau et la rentabilité économique. Ce projet s'inscrit dans une démarche qui vise une utilisation optimale de l'eau et conséquemment des fertilisants par la plante dans un souci de production durable.

2.3 Objectifs spécifiques

- Diminuer les pertes en nitrates par lessivage en prenant en compte la variabilité de la teneur en eau au champ, par la gestion locale de l'irrigation;
- Étudier l'impact possible des deux modes de gestion de l'irrigation sur les maladies importantes de la pomme de terre comme la gale, la rhizoctonie et le mildiou;
- Augmenter les rendements commercialisables dans la production de la pomme de terre;
- Améliorer l'efficacité du rapport volume d'eau appliqué/kg de pomme de terre produit grâce à une gestion locale de l'irrigation;
- Déterminer la faisabilité économique d'une gestion locale de l'irrigation.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1 Site expérimental

Le site expérimental était situé dans un champ d'une superficie de 20 ha en production commerciale de pommes de terre à la Ferme Victorin Drolet. Cette entreprise est localisée à Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (Québec).

Dans un premier temps, 30 sites de suivi ont été répartis à l'intérieur du champ en ayant recours à une technique qui fait appel aux géostatistiques. Ainsi, nous avons suivi la méthode proposée par Isaaks et Srivastava (1989), laquelle consiste à placer un nombre minimal de 30 points de mesures à l'intérieur d'une surface donnée, d'en recueillir les données et de procéder à l'analyse par variographie et krigeage.

La position géographique des 30 sites est indiquée par les points jaunes à la Figure 1, lesquels ont été distribués sur quatre rangées longitudinales (transect), respectivement situées aux 35^e, 79^e, 120^e et 157^e rangs à partir du côté Est du champ (à la droite du site T1). Le premier et le quatrième transect sont composés d'un site de mesure à tous les 100 m et les deux transects centraux, plus près l'un de l'autre, comportent un site de mesure à tous les 200 m. Les sites sont nommés selon leur ordre (T1 à T30).

La texture du sol, dans l'horizon cultivé, oscillait entre le loam sableux et le sable, avec prédominance pour le sable. Dans les strates plus profondes, la texture était un sable grossier. En 2008, selon le site de mesure considéré, le pH du sol variait de 5,54 à 6,32 et le taux de matière organique de 1,75 à 5,13 dans la strate 0-30 cm. En 2010, ces valeurs étaient de 5,69 à 6,27 pour le pH et de 1,84 à 5,39 pour le taux de matière organique.

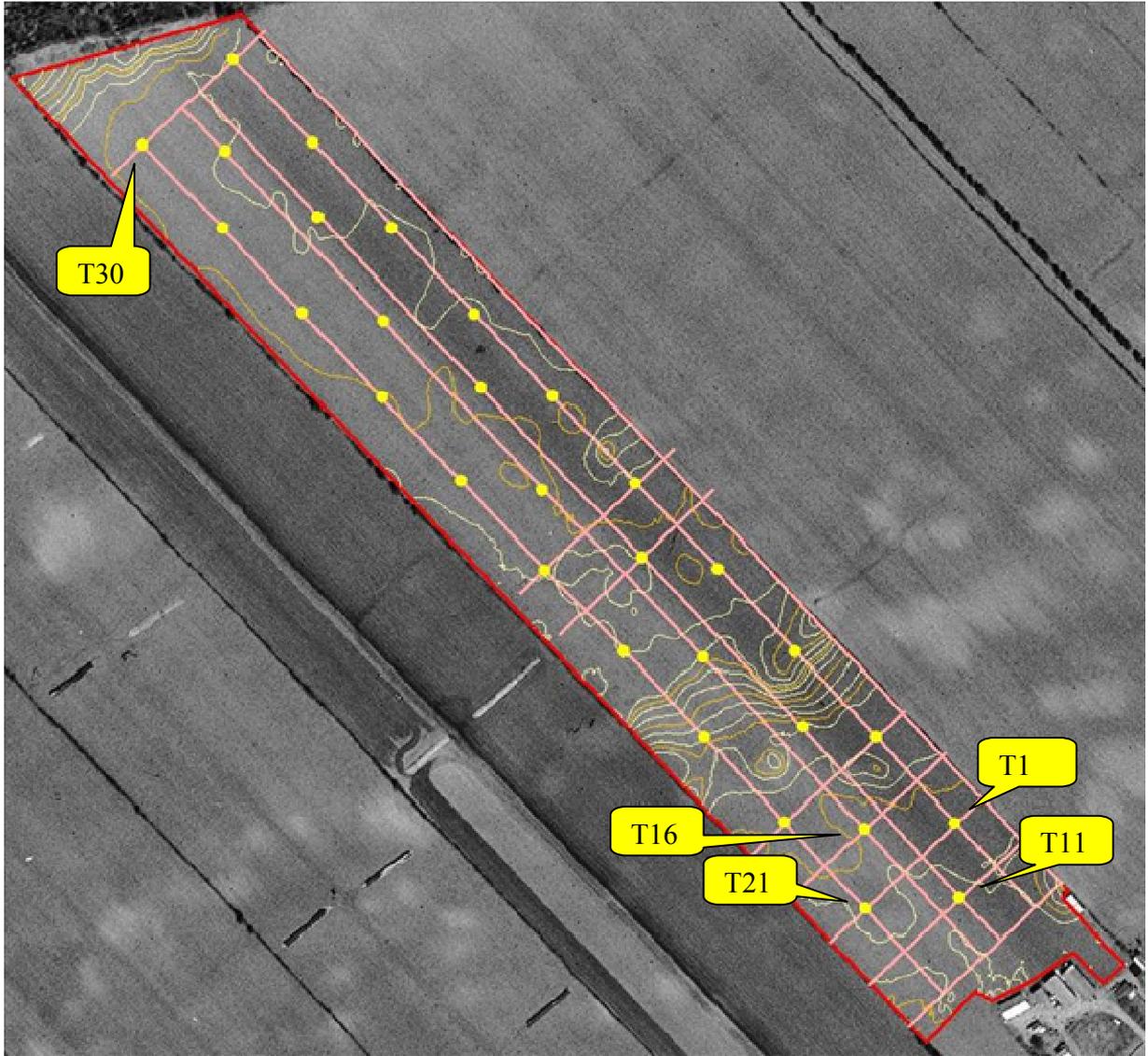


Figure 1. Carte satellite du champ à l'étude où les sites de mesures de la tension de l'eau dans le sol sont indiqués par un point jaune.

3.2 Matériel végétal et régie de culture

Le cultivar de pommes de terre utilisé était la Russet Burbank (Russet B.). La densité de plantation était de 27 340 plants ha⁻¹. Hormis les volumes d'eau apportés par l'irrigation dans les zones où la gestion de cette dernière était selon l'approche locale, la régie de culture était celle du producteur et sous sa responsabilité (travail du sol, plantation, fertilisation et traitements phytosanitaires). L'irrigation était effectuée avec une rampe tirée par un enrouleur. Jusqu'à quatre vitesses d'avancement de la rampe pouvaient être programmées pour un même parcours. Le moment où certaines opérations culturales ont été effectuées est présenté au tableau suivant.

Tableau 1. Historique des différentes opérations culturales.

Opérations	2008	2010
Plantation	13 mai	3 mai
Fractionnement 1	24 juin	9 juin
Fractionnement 2	29 juin	14 juin
Départ d'un cycle d'irrigation	25 août 29 août 2 septembre	13 juillet 21 juillet 29 juillet 11 août 25 août
Récolte	23 septembre	21 septembre

3.3 Types de gestion de l'irrigation comparés

Deux approches de gestion de l'irrigation ont été comparées. La première se voulait une approche « globale » où le volume d'eau apporté était le même pour l'ensemble de la superficie irriguée. L'autre approche tenait compte de la variabilité des patrons d'humidité dans le sol. Cette approche, dite « locale », permettait d'ajuster le volume d'eau. Pour ce faire, le champ a été séparé longitudinalement de sorte à obtenir deux zones symétriques (10 ha chacune).

Les résultats présentés aux points suivants réfèrent régulièrement à quatre emplacements géographiques distincts dans le champ en culture et ces derniers sont indiqués à la Figure 2. Ces quatre zones sont également regroupées selon le type de gestion de l'irrigation utilisée, soit les zones 1 et 2, selon l'approche locale et les zones 3 et 4 selon l'approche globale.

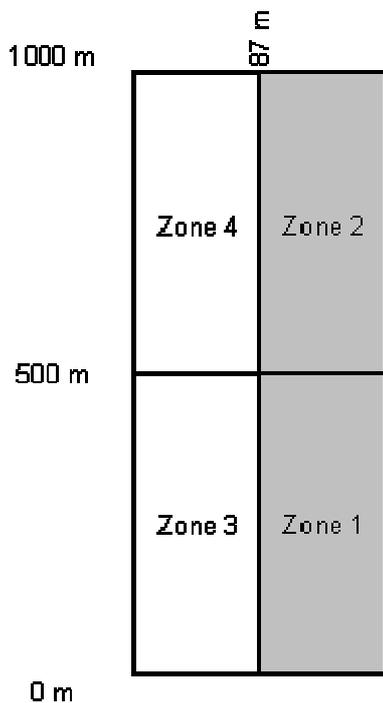


Figure 2. Emplacement des différentes zones de suivis dans le champ à l'étude.

Lorsque la consigne pour déclencher l'irrigation était atteinte, l'ensemble des superficies sous gestion globale de l'irrigation recevait 19 mm (3/4 po.) d'eau par épisode et ce, sans égard à la distribution des patrons d'humidité. En ce qui a trait aux superficies où la gestion de l'irrigation considérait la distribution du potentiel hydrique du sol pour la surface à irriguer lors d'un épisode (locale), le volume d'eau appliqué par épisode d'irrigation était déterminé à partir des valeurs de tensions observées. Ces valeurs sont présentées au tableau suivant.

Tableau 2. Hauteur d'eau appliquée par l'irrigation selon le type de gestion et le statut hydrique du sol au moment de commencer un cycle d'irrigation.

Type de gestion	Tension (kPa)	Hauteur d'eau (mm)
Globale	14-15	19
	14-15	19
Locale	12-13	16
	10-11	13
	8-9	10

Le volume d'eau appliqué par unité de surface est ajusté en programmant la vitesse d'avancement de la rampe. Ainsi, la durée d'un cycle d'irrigation, soit le temps pour irriguer les 4 zones, dépend du volume d'eau appliqué et peut prendre de 50 à 65 heures.

3.4 Collecte des données

3.4.1 Caractérisation du site

En 2008 et 2010, la caractérisation du site a été effectuée sur la strate 0-30 cm de sol sur un échantillonnage composite de chacune des zones d'étude. Par la suite, pour les analyses de sol effectuées à chacun des 30 points de mesures, 3 sous-échantillons étaient prélevés pour former un échantillon composite. Lors de chaque échantillonnage, les sols ont été placés dans une glacière et conservés au frais jusqu'à leur analyse. Avant analyse, ceux-ci ont été tamisés à 2 mm, puis séchés à l'air à 21 °C, excepté ceux servant au dosage des nitrates (N-NO₃) effectués sur sols tamisés frais et rapporté en kg ha⁻¹ sur base sèche (b.s.). La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points, suivie d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des Productions Végétales du Québec, 1988). Le contenu en MO totale a été mesuré selon la méthode d'oxydation par voie humide de Walkley Black (Allison, 1965). Le contenu en N total, préalablement extrait par digestion Kjeldahl, a été déterminé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon (McGill et Figueiredo, 1993). Les N-NO₃ des échantillons de sol ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminés par colorimétrie autoanalyseur Technicon. Le P et les éléments mineurs ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et Simard, 1993) et dosés à l'ICP optique. Des échantillons de sol non perturbé ont également été prélevés à chacun des sites de suivi afin d'établir en laboratoire les courbes de désorption en eau des sols (Topp et al., 1993). L'information obtenue de ces courbes a permis de caractériser certaines propriétés physiques du sol, servant entre autres à identifier les consignes d'irrigation relatives aux différents traitements.

3.4.2 Conditions météorologiques

La pluviométrie (deux pluviomètres HOBO, modèle RG3-M) a été mesurée tout au long des saisons ainsi que la température et l'humidité relative de l'air ambiant avec des acquiseurs de données HOBO Pro v2 (modèle U23-001).

3.4.3 Tension de l'eau du sol

La tension de l'eau dans le sol à chacun des 30 sites a été mesurée tout au long du projet avec des tensiomètres Hortau (modèle T80 et Tx80) afin de gérer les épisodes d'irrigation. Toutes ces données étaient enregistrées en temps réel dans un ordinateur à l'aide du logiciel Irrolis-Light (version 1.9) de Hortau.

3.4.4 Suivi du lessivage des nitrates dans le sol et prélèvement en azote par la culture

Les nitrates du sol ont été déterminés dans chacune des 30 zones de mesures à partir de 3 échantillons composites des strates 0-30, 30-60 et 60-90 cm. Cinq dates d'échantillonnage se sont étalées sur la saison, soit au printemps avant la plantation et l'application des engrais, en juin juste avant l'apport de N au fractionnement, en juillet lors de la pleine floraison, à la fin août lors de la maturation des tubercules juste avant le défanage et finalement, en post-récolte. Ces mesures ont permis d'effectuer le suivi du mouvement des nitrates à travers le profil de sol en mesurant leurs concentrations à chacune des strates dans le temps. Les échantillonnages ont été effectués dans un rayon de deux mètres autour du tensiomètre au moyen de sondes à tube creux de deux centimètres de diamètre, à l'exception de ceux faits au printemps et en post-récolte qui ont pu être effectués à l'aide d'un échantillonneur de sol hydraulique de marque Giddings.

En ce qui a trait au prélèvement de l'azote par la culture (PVL_{plant}), trois plants entiers (fanés) étaient récoltés avant le défanage, au maximum de leur développement. Ceux-ci étaient ensuite séchés à 65 °C. Leur masse sèche (MS) était alors déterminée et ils étaient ensuite broyés ensemble à 100 mesh pour former un échantillon composite sur lequel le contenu en N total était dosé. Le N_{tot} a été extrait par digestion Kjeldahl (Isaac et Johnson 1976) et dosé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon. Par ailleurs, lors de la récolte, un échantillon composite de cinq tubercules sains, non-pelés et nettoyés, a été prélevé à chacun des points de mesures avant de faire le classement des tubercules (tubercules du rendement total). Ceux-ci étaient découpés en bâtons, mis à sécher à 65 °C et broyés. Le N total était extrait tel que décrit précédemment pour les plants et dosé par colorimétrie automatisée sur autoanalyseur Technicon. Les prélèvements en N et les exportations en ont été calculés comme suit :

$$PVL_{\text{plant}} = (\text{MS plant} * \text{Concentration en N total plant}) * \text{nb de plants/ha}$$

$$\text{Exportations} = (\text{MS en tubercules} * \text{Concentration en N total des tubercules})$$

$$PVL \text{ totaux en N} = PVL_{\text{plant}} + \text{Exportations}$$

3.4.5 Récolte et classement des tubercules

Lors de la récolte, les rendements ont été mesurés à partir des tubercules récoltés sur 3,5 mètres dans les 2 rangs centraux de chacun des 30 sites de mesure. Les tubercules ont été classés par calibre. Les rendements totaux et vendables ont été déterminés selon les normes de l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) pour les pommes de terre de type long : Canada N° 1 : diam > 51 mm et < 89 mm; excluant les grelots de moins de 51 mm de diamètre, mais retenus si plus long que 89 mm avec diamètre

minimal de 44 mm. Canada N° 1 grosse : diam > 89 mm et < 114 mm. La qualité des tubercules a aussi été établie et la présence de gale commune (*Streptomyces scabies*) et de rhizoctonie a été évaluée. L'évaluation du degré d'infestation des tubercules par la gale commune a été réalisée à partir d'une méthode développée par Otrysko et Banville de la Station de recherche Les Buissons du MAPAQ. L'indice de gale calculé par cette méthode utilise un facteur de pondération variant de 1 à 5, qui tient compte à la fois de l'étendue et du type de symptôme observé sur les tubercules. Vingt-cinq tubercules (calibre Canada N° 1) ont été prélevés de façon aléatoire dans chacun des lots récoltés. Chacun des tubercules a été classé selon le degré de sévérité des symptômes (superficiels, pustules, confluents ou creux profonds) et le pourcentage de recouvrement de ceux-ci sur le tubercule (0 % à trace, trace à 5 %, 5-20 %, 20-40 %, 40 % et +). Le nombre total de tubercules par catégorie a ensuite été calculé. Le facteur de pondération approprié a été attribué à chacune des catégories en fonction de l'intensité de la combinaison sévérité et étendue des dommages. L'indice de gale a été calculé en additionnant les résultats issus de la multiplication du nombre de tubercules d'une catégorie par son facteur de pondération, puis en divisant cette somme par le nombre total de tubercules évalués.

D'autre part, le poids spécifique a été mesuré à partir d'un sous-échantillon de 3 kg de tubercules par parcelle. Le sous échantillon a d'abord été pesé (poids dans l'air). Les tubercules ont ensuite été plongés dans l'eau et le poids noté à nouveau (poids dans l'eau). Le poids spécifique est issu de la division du poids dans l'air par la différence entre le poids dans l'air et celui dans l'eau.

4 RÉSULTATS ET ANALYSE

4.1 Résultats obtenus et analyse en fonction des objectifs spécifiques

4.1.1 Diminuer les pertes en nitrates par lessivage en prenant en compte la variabilité de la teneur en eau au champ, par la gestion locale de l'irrigation

Ce projet n'a pas permis de démontrer que les pertes en nitrates par lessivage peuvent être diminuées en prenant en compte la variabilité de la teneur en eau du sol au champ par la gestion locale de l'irrigation. Les mesures de prélèvements en N de la culture, de la teneur en nitrates du sol et de leur suivi au travers du profil de sol indiquent toutefois que les conditions hydriques du sol ont bel et bien influencé le devenir du N. Cependant, la gestion locale n'a pas permis d'influer sur la nutrition N de la culture et les pertes en nitrates car le type de gestion n'a pas réussi à compenser pour les patrons d'humidité du sol qui se sont avérés très forts et persistants. D'ailleurs, à ce niveau, dans le cas de plusieurs mesures, les résultats ont été similaires selon les zones étudiées pour les deux années, indiquant la permanence de l'impact des patrons.

Le suivi des teneurs en nitrate au travers des diverses strates du profil du sol (Figure 3 et Figure 4) illustre bien l'impact des conditions climatiques saisonnières sur le devenir du N au champ dans la culture de la pomme de terre. En effet, les teneurs en nitrates mesurées en 2008 (saison très pluvieuse) sont très inférieures à celles dosées en 2010, qui a été une saison relativement sèche (Figure 12 et Figure 13). Ainsi, si les valeurs de 2010 dans la couche utile de sol (0-30 cm) se maintiennent sur une bonne période entre 24 et 58 mg kg⁻¹ sol sec, celles de 2008 ne dépassent pas 8 mg kg⁻¹ sol sec. Elles demeurent donc basses sur l'ensemble de la saison. Étant donné qu'une fertilisation similaire en N a été apportée les deux années, il semble donc qu'une partie beaucoup moins grande de cet apport en N soit demeuré dans la strate utile de sol lors de la saison pluvieuse de 2008, d'autant plus que les prélèvements en N ont aussi été moins importants.

Les mesures de nitrates des strates inférieures appuient cette hypothèse. En effet, suivant les apports de N à la plantation et au fractionnement, les teneurs en nitrates de la strate utile de sol (0-30 cm) devraient être augmentées de façon marquée par rapport à celles mesurées avant la plantation au printemps. Toutefois, ce n'est pas ce qui ressort en 2008. En effet, les teneurs en nitrates de la strate utile suivant la fertilisation printanière et l'apport de N au fractionnement sont similaires à celles, très basses, mesurées au printemps. Le nitrate s'est donc peu accumulé dans le sol et semble plutôt avoir migré rapidement au travers du profil de sol. D'ailleurs, alors qu'au 12 mai il n'y a pratiquement aucun nitrate dans les strates 30-60 et 60-90 cm (0,62 mg kg⁻¹ sol sec), dès le 19 juin, juste avant l'apport fractionné de N, les teneurs en nitrates du sol de ces deux strates (valeurs moyennes entre 4,24 et 5,49 mg kg⁻¹ sol sec) deviennent équivalentes à celle de la couche utile de sol (valeur moyenne de 5,24 mg kg⁻¹ sol sec). Une bonne partie du N apporté au printemps semble donc avoir déjà migré hors de portée des plants. La mesure effectuée le 24 juillet, soit un mois après le fractionnement du N, montre

également la présence de nitrates dans ces strates de sol, indiquant que l'apport de N au fractionnement a également été lessivé et ce, plutôt rapidement.

En 2010, les conditions climatiques ont fait en sorte que la fertilisation azotée a bien joué son rôle. Ainsi, il y a une très forte hausse, de l'ordre de huit fois, en ce qui a trait à la disponibilité en nitrates dans la couche utile de sol (0-30 cm) en date du 4 juin, comparativement aux valeurs mesurées avant la plantation. De plus, à cette date, bien qu'un mois se soit écoulé depuis la fertilisation printanière, les teneurs en nitrates dans les strates inférieures demeurent similaires à celles du printemps, suggérant que le N des engrais est demeuré en surface dans la zone exploitée par les plants. D'ailleurs, les mesures prises le 19 juillet permettent de constater que le sol de la strate utile contient encore autant, sinon plus, de nitrates que le sol au 4 juin. Ceci indique que l'apport de N au fractionnement a permis de maintenir, sinon de hausser, la disponibilité en nitrates pour la culture, même un mois après son application. En fait, au cours de la saison 2010, les premières hausses de teneurs en nitrates des strates inférieures n'ont été mesurées qu'à partir du 19 juillet. De plus, celles-ci s'avèrent relativement basses, comparativement à ce qui demeure dans la strate supérieure de sol (0-30 cm). Ce n'est qu'à partir du 30 août que la richesse en nitrates de la strate supérieure diminue nettement, avec présence de nitrates également dans les strates inférieures. Puisque cette mesure a été prise après une période regroupant plusieurs épisodes d'irrigation (21 juillet, 29 juillet, 11 août et 25 août), on peut penser que les apports d'eau ont contribué à cette diminution. Toutefois, les teneurs en nitrates demeurent encore relativement élevées, comparativement aux valeurs du sol avant fertilisation au printemps et considérant la date déjà tardive de prise de mesure. Ce n'est que lors de la dernière mesure, au 20 octobre, soit 1 mois et demi après le défanage, que les teneurs en nitrates de l'ensemble des strates retrouvent une valeur similaire à celle du printemps.

En somme, les conditions de 2010 ont permis le maintien d'une meilleure disponibilité en N dans la couche utile de sol que celles de 2008. Il n'est donc pas étonnant, par ailleurs, de constater que des rendements, tant totaux que vendables, plus bas (jusqu'à 8 t ha⁻¹) ont été produits en 2008, comparativement à ceux atteints en 2010.

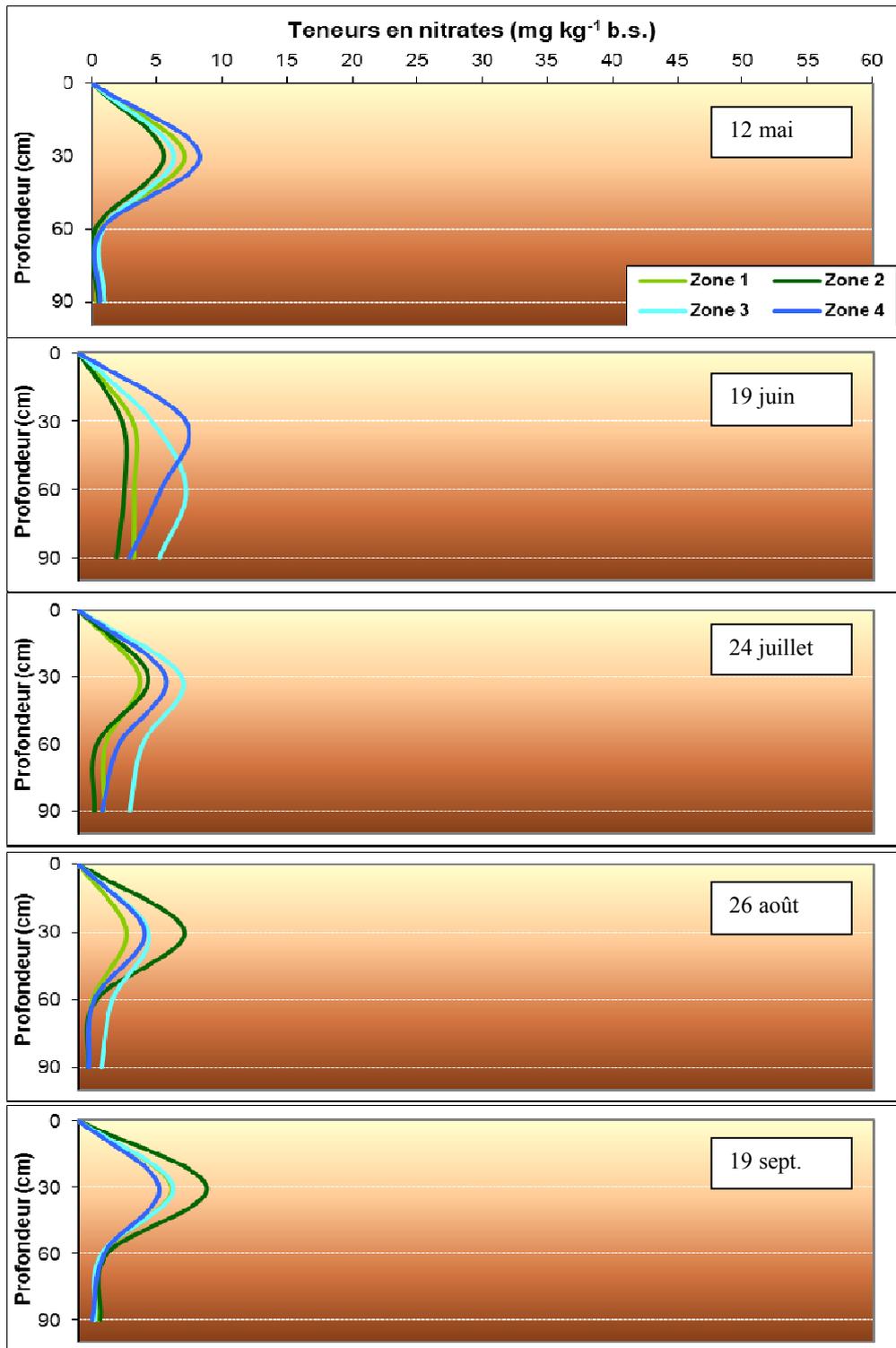


Figure 3. Teneurs en nitrates au travers du profil de sol en cours de saison, été 2008.

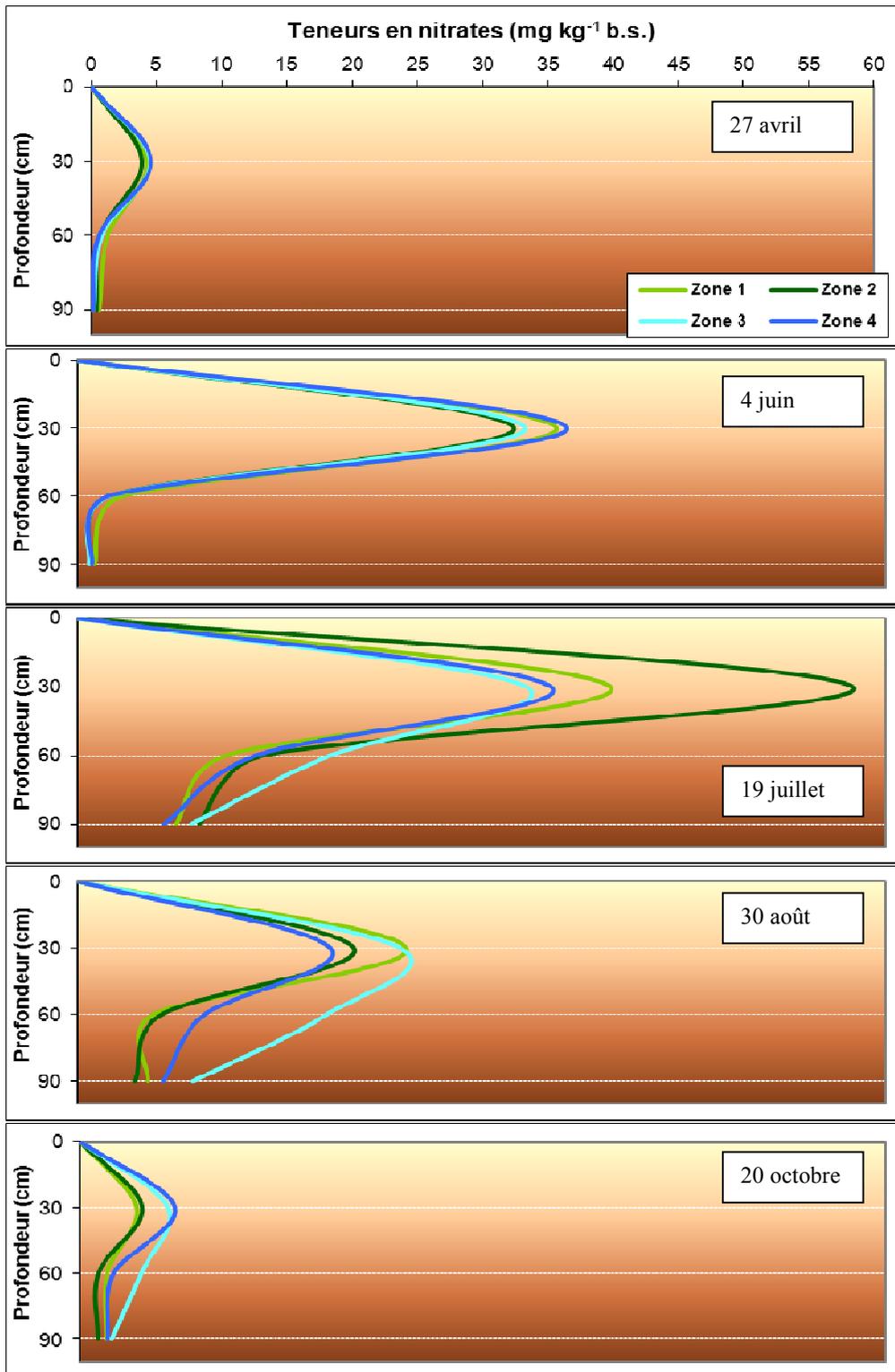


Figure 4. Teneurs en nitrates au travers du profil de sol en cours de saison, été 2010.

La cartographie de la distribution spatiale des teneurs en nitrates des 30 points de mesures est une autre façon de bien visualiser l'impact des conditions climatiques des deux années sur la disponibilité en N du sol pour la culture. À la Figure 5, présentant les patrons de distribution des nitrates dans la couche 0-30 cm de sol sur la saison, on remarque facilement que les teneurs sont peu différentes d'une zone à l'autre du champ en 2008, probablement parce que le lessivage s'est produit dans toutes les zones du champ étant donné les forts apports en eau de pluie constants sur la saison. Par contre, en 2010, on voit clairement l'enrichissement marqué en nitrates dans le sol sur une majeure partie de la saison. Par la suite, à la Figure 6 portant sur la strate 30-60 cm, on peut observer qu'en 2008, les teneurs en nitrates ont augmenté dès le mois de juin, comparativement à 2010 où elles ont augmenté en juillet. Enfin, à la Figure 7 portant sur la strate 60-90 cm, on discerne facilement qu'en 2008, les nitrates atteignent cette profondeur dès la 2^e mesure et semblent être majoritairement lessivés suivant la fin juillet. À l'inverse, le mouvement des nitrates à cette profondeur n'est perçu qu'à partir de la fin juillet en 2010 et est toujours présent au 30 août, indiquant qu'il restait encore des nitrates dans le profil de sol.

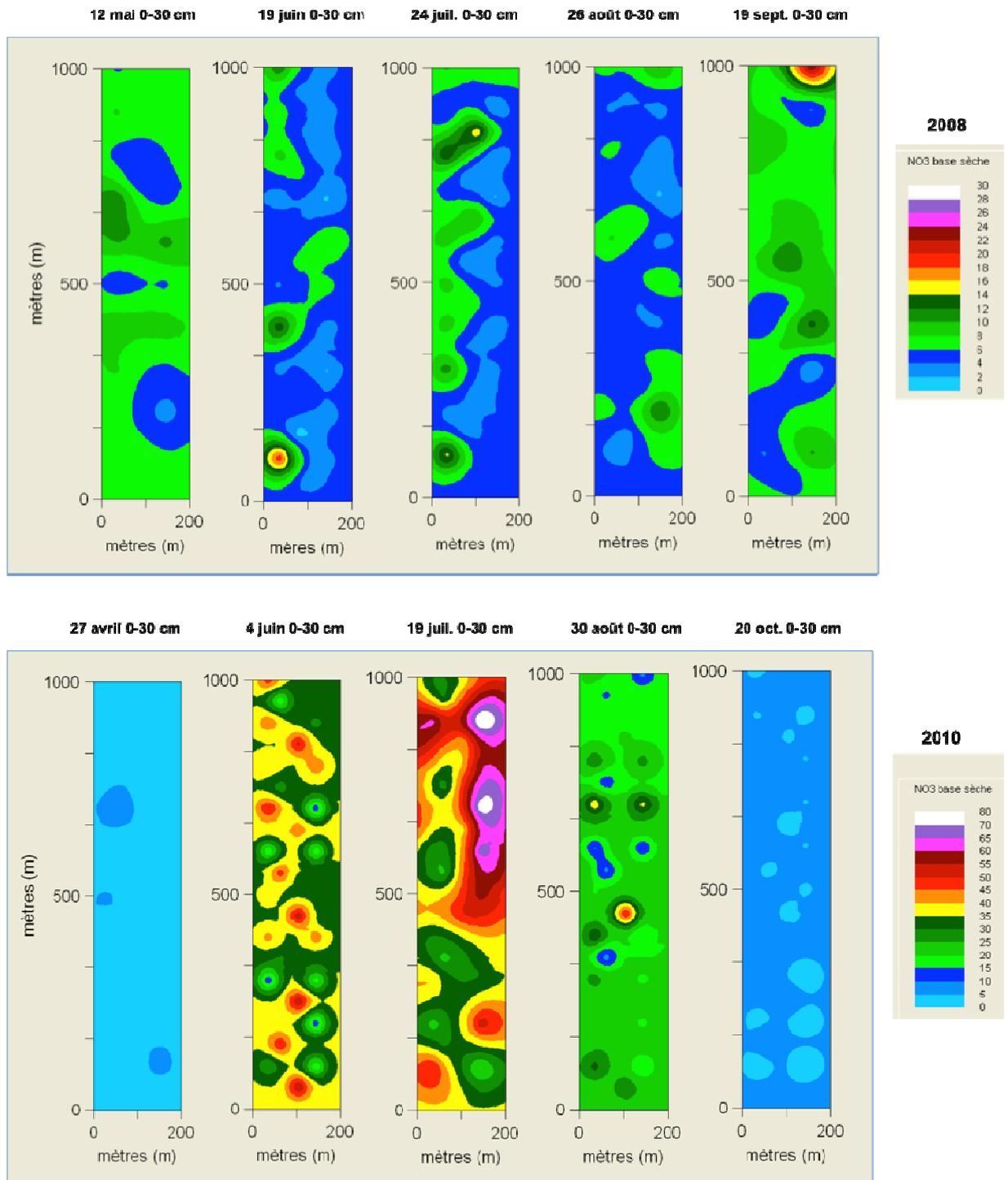


Figure 5. Distribution des teneurs en nitrates mesurées en 2008 et 2010 dans la strate 0-30 cm de sol. N.B. Les valeurs d'échelle des légendes sont différentes les deux années.

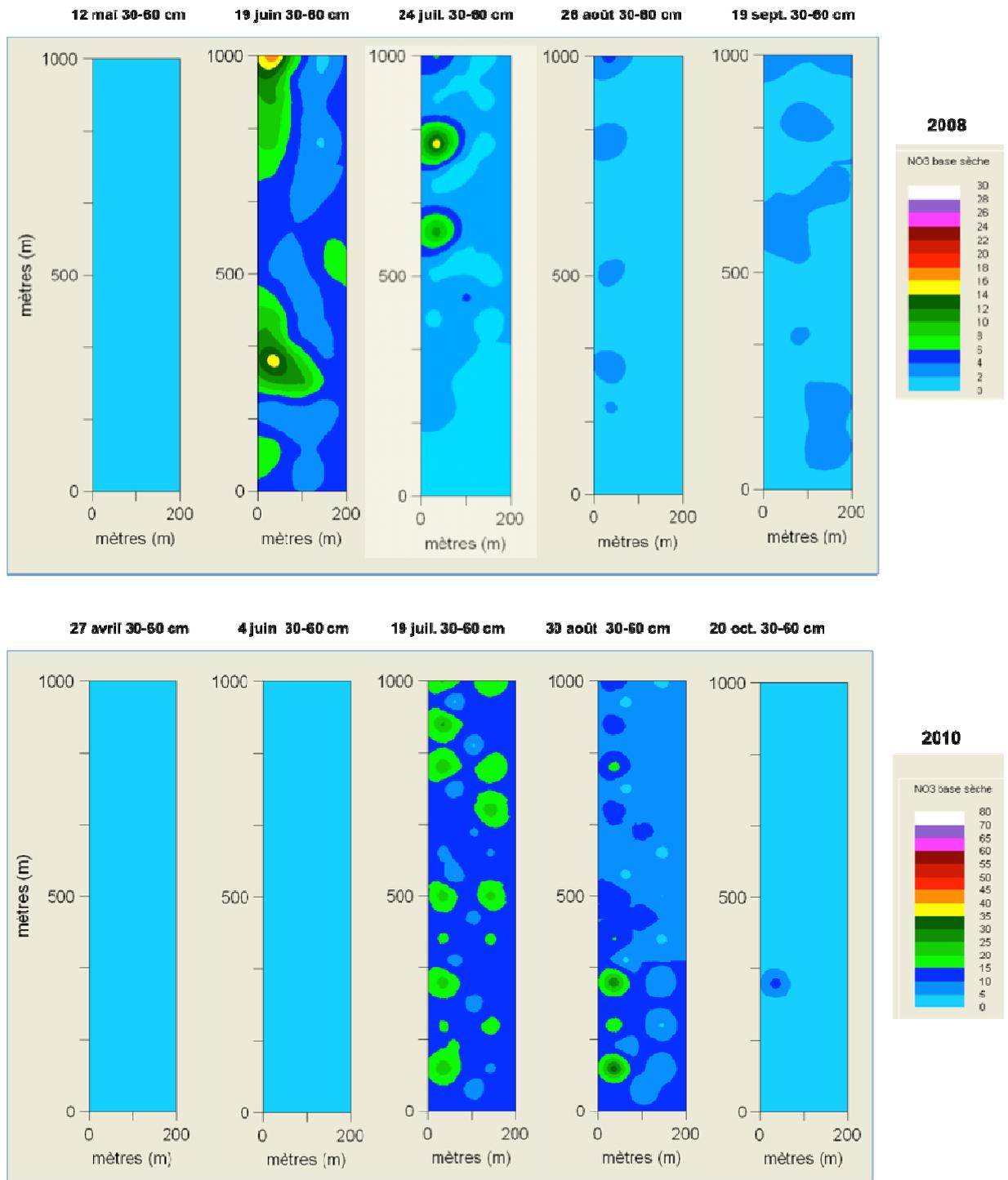


Figure 6. Distribution des teneurs en nitrates mesurées en 2008 et 2010 dans la strate 30-60 cm de sol. N.B. Les valeurs d'échelle des légendes sont différentes les deux années.

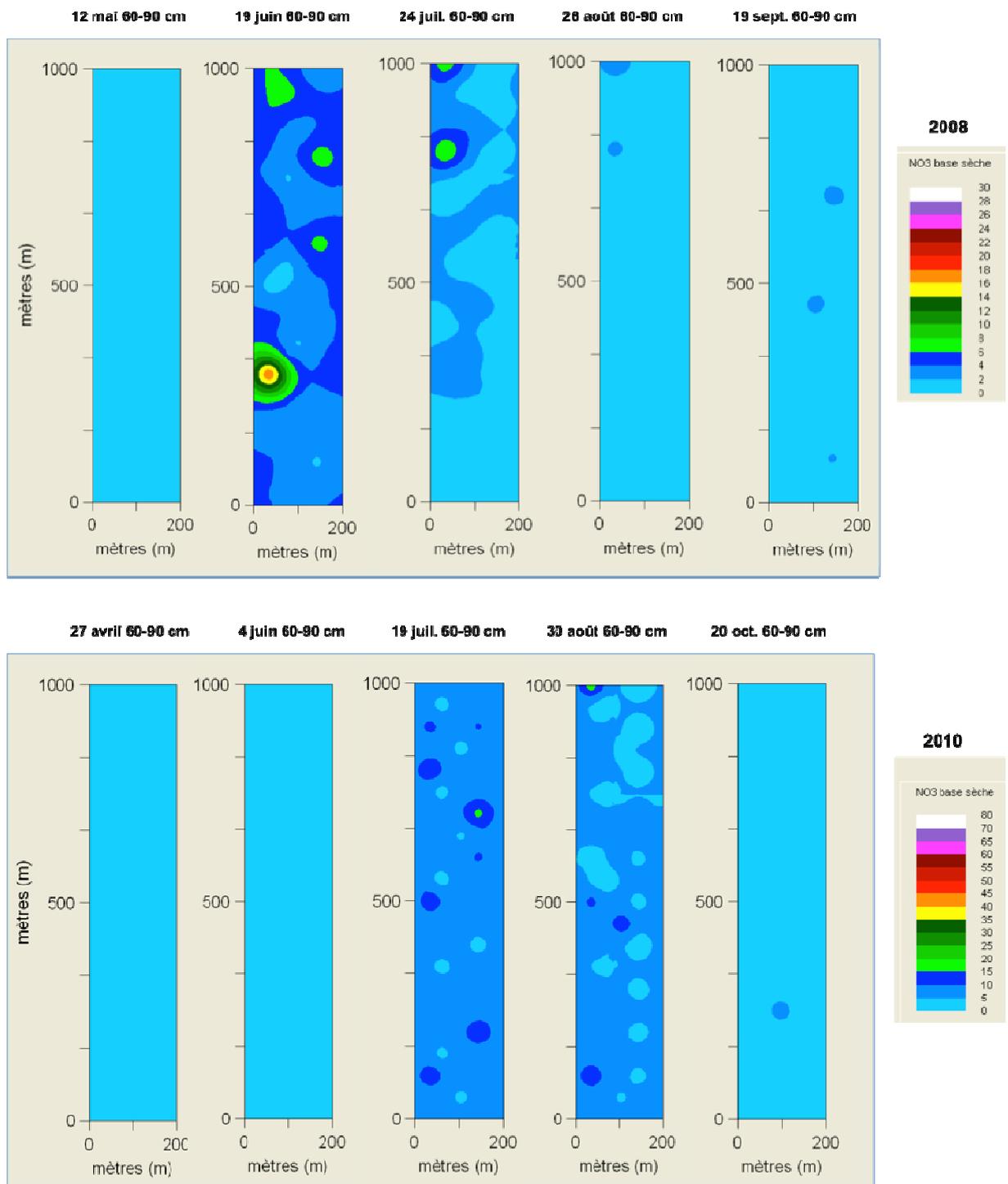


Figure 7. Distribution des teneurs en nitrates mesurées en 2008 et 2010 dans la strate 60-90 cm de sol. N.B. Les valeurs d'échelle des légendes sont différentes les deux années.

Les données de la saison 2010 présentant de plus grands écarts de tension, ont été utilisées afin de voir s'il existe un lien entre la tension de l'eau dans le sol lors de périodes dites « sèches », qui permet de bien repérer les zones ayant tendance à rester plus humides en saison, et la perte des nitrates (Tableau 3). Selon les coefficients de corrélation obtenus entre les quatre zones étudiées, il ressort qu'au printemps, plus le sol de la zone de mesure est sec (forte tension), plus il y a de nitrates disponibles dans la couche utile de sol (0-30 cm) et moins il y en a en profondeur (sous les 30 cm). Au 4 juin, soit environ un mois après l'apport d'engrais N à la plantation, une situation similaire s'observe. Encore une fois, ceci suggère que dans les zones du champ où le sol demeure plus humide, le N apporté et /ou fourni par le sol demeure moins longtemps en surface et migre davantage au travers du profil de sol, hors de portée de la culture. Au final, en post-récolte, ces mêmes zones contiennent d'ailleurs le moins de nitrates disponibles, indiquant que ces zones ont été davantage « vidées » de leur contenu en nitrates. Ces résultats concordent avec le comportement reconnu des nitrates dans le sol, soit leur sensibilité au lessivage en présence d'excès d'eau. Toutefois, ils apportent l'information supplémentaire que les patrons de tensions dans le sol, lorsque celui-ci est en période sèche, pourraient permettre de comparer les risques de lessivage des nitrates des diverses zones dans un champ donné.

Tableau 3. Coefficient de corrélation (r) de Pearson entre la teneur en nitrates moyenne des zones de mesure pour certaines dates cibles et la tension de l'eau en période « humide » dans le sol pour la saison 2010.

Variables testées		Tensions en eau moyenne du sol		
		Printemps (27 avril)	Avant fractionnement (4 juin)	Post-récolte (20 octobre)
Nitrates (0-30 cm)	r	0,67	0,59	0,80
Nitrates (30-60 cm)	r	-0,65	-0,52	Pas de lien
Nitrates (60-90 cm)	r	-0,68	Pas de lien	Pas de lien

Une disponibilité moindre en N sur la saison pour la culture peut donc être envisagée pour les zones qui demeurent plus humides. Les coefficients de corrélation obtenus entre les rendements produits et la teneur en nitrates de la couche utile de sol en saison vont d'ailleurs en ce sens (Tableau 4). En effet, en début de saison, il y a un lien positif entre la disponibilité des nitrates et les rendements produits. Ainsi, les sols contenant le moins de nitrates sont aussi ceux ayant donné le moins de rendement, tant total que vendable, au final. Par la suite, un lien inverse se développe. Ainsi, fin juillet et août, selon les saisons, les sols où il reste plus de nitrates dans la couche utile sont ceux où l'on retrouve aussi moins de rendement. Ce lien en fin de saison pourrait s'expliquer du fait que les plants se retrouvant dans les zones moins favorables à la production vont incidemment moins puiser de N du sol pendant la période la plus active de développement, laissant plus de reliquats de N.

Tableau 4. Coefficient de corrélation (r) de Pearson entre la teneur moyenne en nitrates du sol (0-30 cm) des zones de mesure et les rendements totaux et vendables produits en 2008 et 2009.

Années	Variables testées	Rendement total	Rendement vendable
2008	Nitrates (0-30cm)		
	12 mai	0,92	0,90
	19 juin	0,78	0,84
	24 juillet	Pas de lien	Pas de lien
	26 août	-0,87	-0,81
	19 septembre	-0,99	-0,99
2010	Nitrates (0-30cm)		
	27 avril	0,71	0,80
	4 juin	0,90	0,88
	19 juillet	-0,89	-0,87
	30 août	Pas de lien	Pas de lien
	20 octobre	Pas de lien	Pas de lien

À ce propos, la mesure des prélèvements totaux en N par la culture, incluant les exportations en N par la récolte, indiquent que la zone présentant les rendements les plus bas en 2008 et 2010 (Tableau 7 voir la zone 2) est aussi celle avec les plus faibles prélèvements en N (Tableau 5). En 2008, les prélèvements totaux en N de cette zone étaient de 23 à 16 % plus bas que ceux des autres zones, ce qui représente de 27 à 42 kg ha⁻¹ en N de moins de prélevés par la culture. En 2010, cette situation se maintient, avec des prélèvements totaux en N de 31 à 17 % moindres dans la même zone, comparativement au reste du champ. Ainsi, de 30 à 63 kg supplémentaires de N sont restés non prélevés au champ dans cette zone. Au final, pour les deux années, ces différences s'avèrent importantes en termes de risques accrus de perte de nitrate dans le milieu récepteur et suggèrent l'importance que revêt la gestion de l'état hydrique des sols en culture en regard de cette problématique.

Tableau 5. Prélèvements et exportation en azote mesurés dans les 4 zones d'étude en 2008 et 2010.

Zone	Type de gestion	Prélèvement en N des plants (kg N ha ⁻¹)		Exportation en N par les tubercules (kg N ha ⁻¹)		Prélèvements totaux (kg N ha ⁻¹)	
		2008	2010	2008	2010	2008	2010
		1	Locale	35	31	134	162
2	31	26		110	119	141	145
3	Globale	50	29	132	146	183	175
4		39	43	132	165	170	208

4.1.2 Étudier l'impact possible des deux modes de gestion de l'irrigation sur les maladies importantes de la pomme de terre comme la gale, la rhizoctonie et le mildiou

L'indice de gale et de rhizoctonie a été mesuré sur les tubercules récoltés aux 30 sites qui faisaient l'objet d'un suivi. Ces indices ont d'abord été regroupés sous forme de moyennes et sont présentés au Tableau 6. Par la suite, leurs distributions dans le champ ont été cartographiées et sont respectivement présentées aux Figure 8 A et B et Figure 9 A et B.

Tableau 6. Indices de gale et de rhizoctonie mesurés sur les tubercules récoltés aux 30 sites de mesure.

Zone	Type de gestion	Indice de gale			Indice de rhizoctonie		
		2007	2008	2010	2007	2008	2010
1	Locale	0,92	0,12	1,41	0,20	0,26	0,20
2		3,20	0,79	3,19	0,17	0,33	0,28
3	Globale	1,31	0,06	1,27	0,18	0,28	0,29
4		2,01	0,04	0,98	0,10	0,43	0,49

Les conclusions du projet réalisé en 2007 suggéraient que les excès d'humidité possiblement en cause dans la diminution des rendements dans certaines zones étaient dus à un apport excédentaire d'eau par la pluie et l'irrigation. En 2007, l'irrigation était gérée selon une approche globale pour l'ensemble du champ et une relation significative ($p = 0,021$) entre la tension de l'eau dans le sol en période humide et l'indice de gale avait été identifiée, cette dernière indiquant une incidence plus élevée dans les zones plus humides.

En 2008, la moyenne des indices de gale observée sur les tubercules, selon la zone où ils ont été récoltés, est plus faible que celle de 2007 et 2010. Toutefois, c'est dans la zone 2 que la moyenne des indices est la plus élevée, et ce, peu importe la saison. À la Figure 8 B, il est facile de distinguer la zone 2 par sa coloration rouge. Le sol de la zone 2 est généralement plus humide que celui des autres zones et cette situation pourrait expliquer l'indice plus élevé mesuré dans cette partie du champ.

À propos de la rhizoctonie, il est reconnu que cette maladie est plus présente en conditions de sol humide. Toutefois, aucune relation significative n'a permis d'appuyer ce constat. Les indices mesurés en 2008 sont légèrement supérieurs à ceux mesurés en 2007 et les résultats de 2010 se placent entre les deux. Il est à noter que les indices demeurent très faibles.

En ce qui a trait au mildiou, aucun problème relié à cette maladie n'a été relevé.

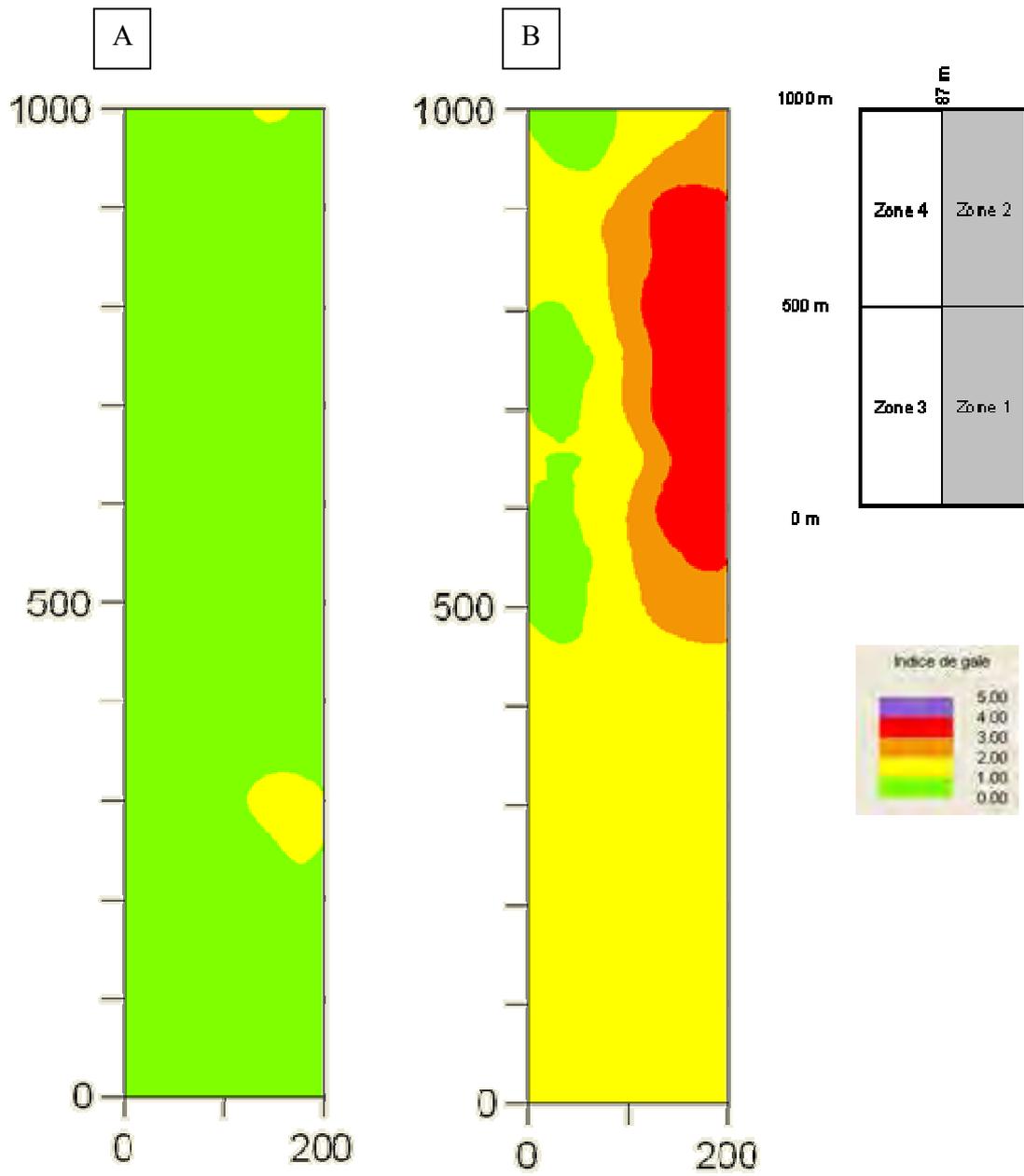


Figure 8. Distribution de l'indice de gale mesurée en 2008 (A) et 2010 (B).

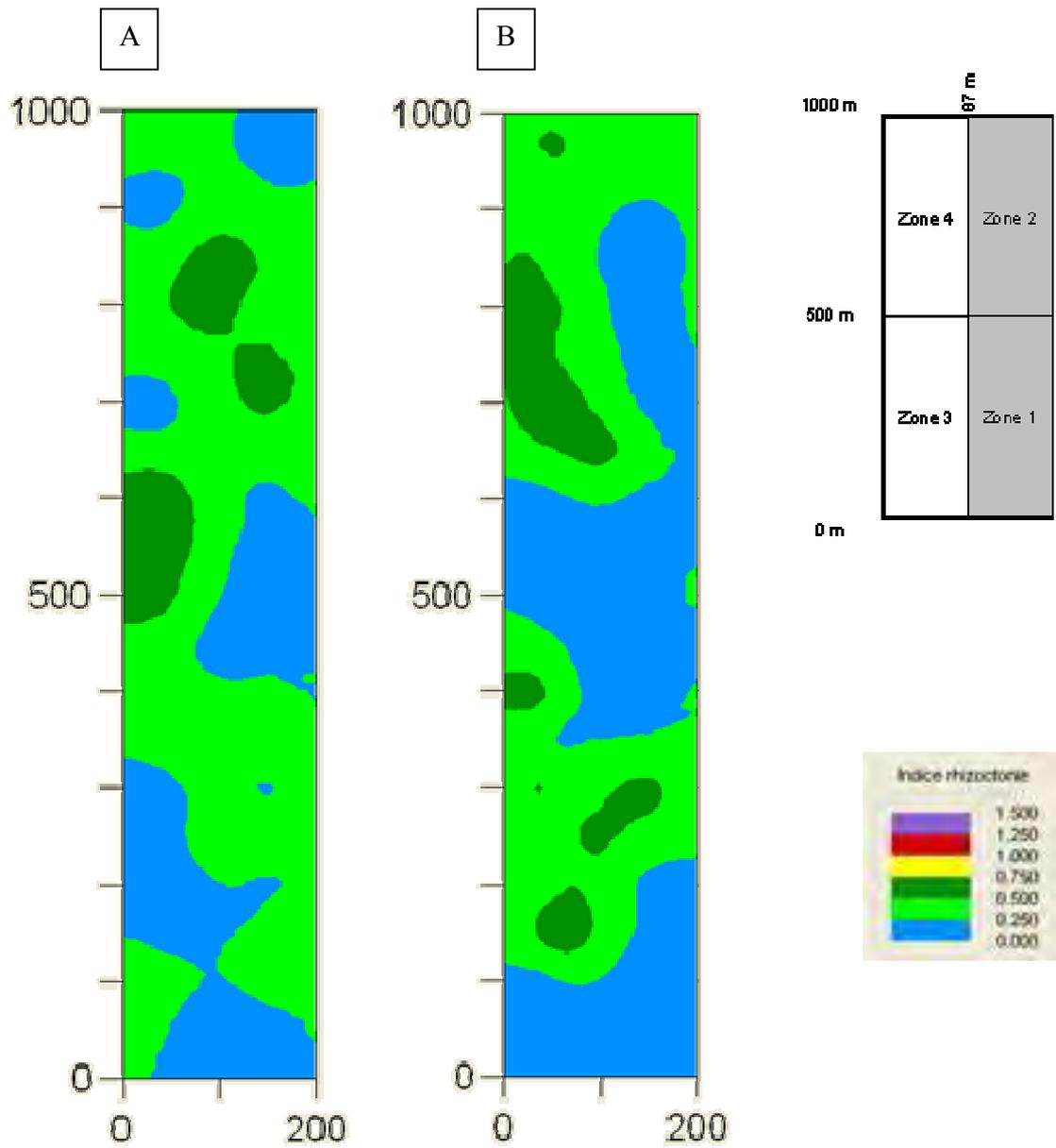


Figure 9. Distribution de l'indice de rhizotonic en 2008 (A) et 2010 (B).

4.1.3 Augmenter les rendements commercialisables dans la production de la pomme de terre

Les essais réalisés en 2007 ont permis d'établir une relation entre les zones dans le champ qui sont plus humides et un rendement vendable plus faible, comparativement aux zones généralement plus sèches. Le statut hydrique du sol étant identifié comme la cause de la baisse de rendement, un des objectifs du projet réalisé en 2008 et 2010 était de considérer la variation spatio-temporelle du statut hydrique du sol dans l'évaluation des volumes d'eau qui seraient appliqués lors d'un épisode d'irrigation. Ainsi, en appariant les besoins avec les apports, il serait peut-être possible d'homogénéiser les patrons d'humidité et par conséquent les rendements.

La distribution des rendements totaux et vendables, ainsi que la proportion des tubercules rejetés pour 2008 et 2010 sont d'abord présentées au Tableau 7. Ensuite, la distribution des rendements a été présentée à la Figure 10 A et B et à la Figure 11 A et B. Les patrons de distribution des rendements sont comparables à ceux observés en 2007 et les rendements les plus faibles sont concentrés dans la zone 2, alors que les rendements les plus élevés sont concentrés dans les zones 1 et 4.

En 2008, la première irrigation a été réalisée au 104^e jour suivant la plantation. Conséquemment, la croissance des plants s'est effectuée sous une gestion globale (pluie) durant la majeure partie de la saison, ce qui limitait la possibilité de mesurer l'impact potentiel d'une gestion locale sur les rendements. De plus, au moment de débiter le premier cycle d'irrigation, certains plants montraient des signes de sénescence. En 2010, le premier des cinq cycles d'irrigation a commencé le 13 juillet et le dernier, le 25 août. Conséquemment, les besoins en irrigation sont survenus suffisamment tôt en saison et en nombre satisfaisant pour être en mesure de comparer les deux approches de gestion. Toutefois, s'il est possible d'affirmer que les rendements semblent supérieurs en 2010, il est plus difficile de relier le type de gestion aux résultats obtenus. Certes, la proportion de tubercules rejetés mesurée est plus élevée avec la gestion locale, mais cette tendance s'observe depuis 2007 et semble fortement conséquente aux patrons d'humidité observés.

Tableau 7. Rendement total et vendable en tubercules (t/ha) pour 2008 et 2010.

Zone	Type de gestion	Rendement 2008			Rendement 2010		
		Total (t/ha)	Vendable (t/ha)	Rejet (%)	Total (t/ha)	Vendable (t/ha)	Rejet (%)
1	Locale	36,7	29,2	21,0	43,7	37,0	15,3
2		29,9	23,8	20,0	31,9	25,8	19,1
3	Globale	35,3	29,2	17,4	38,3	33,5	12,3
4		38,7	31,7	18,0	42,8	37,0	13,7

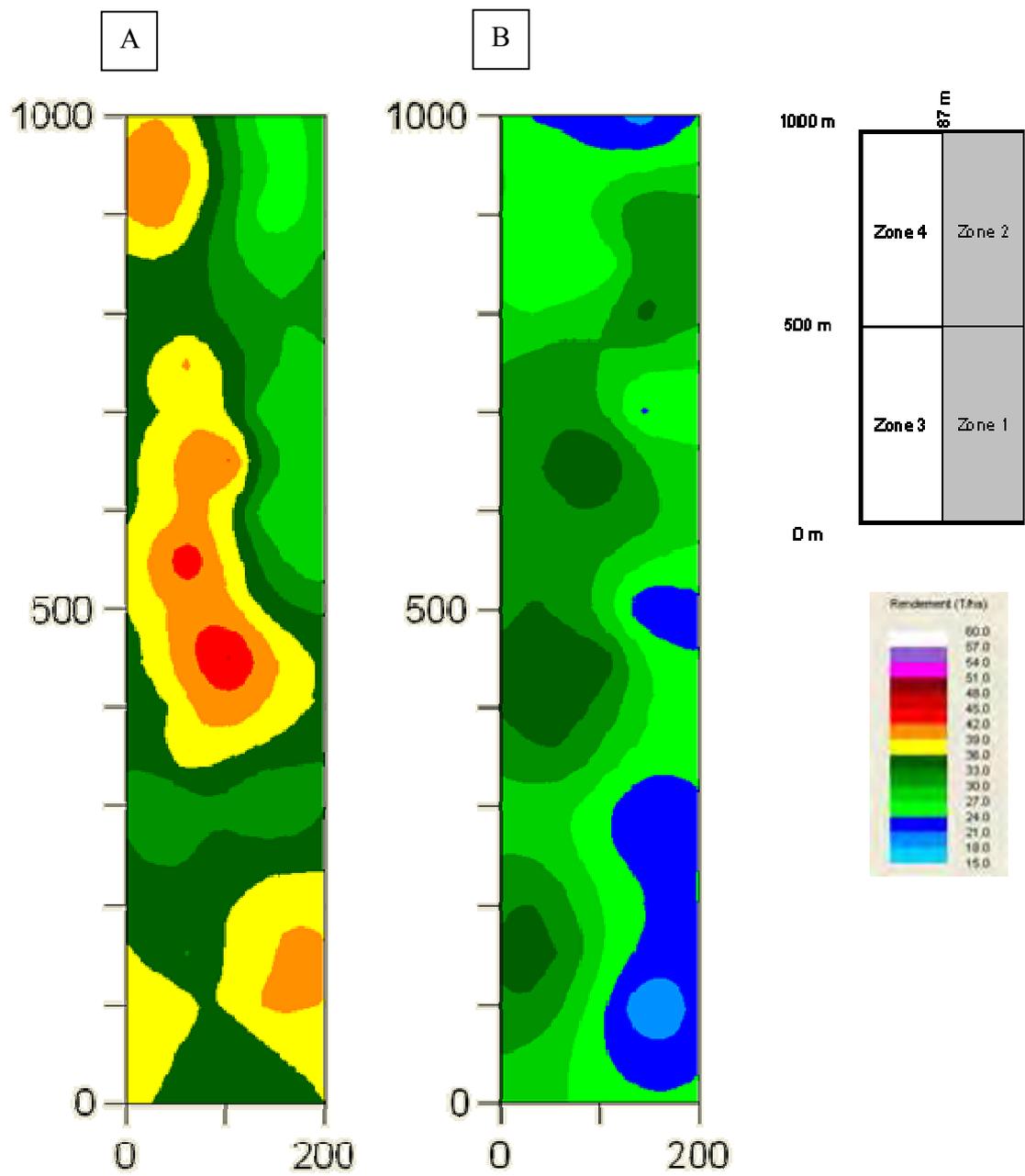


Figure 10. Distribution des rendements totaux (A) et vendables (B) en 2008 (t/ha).

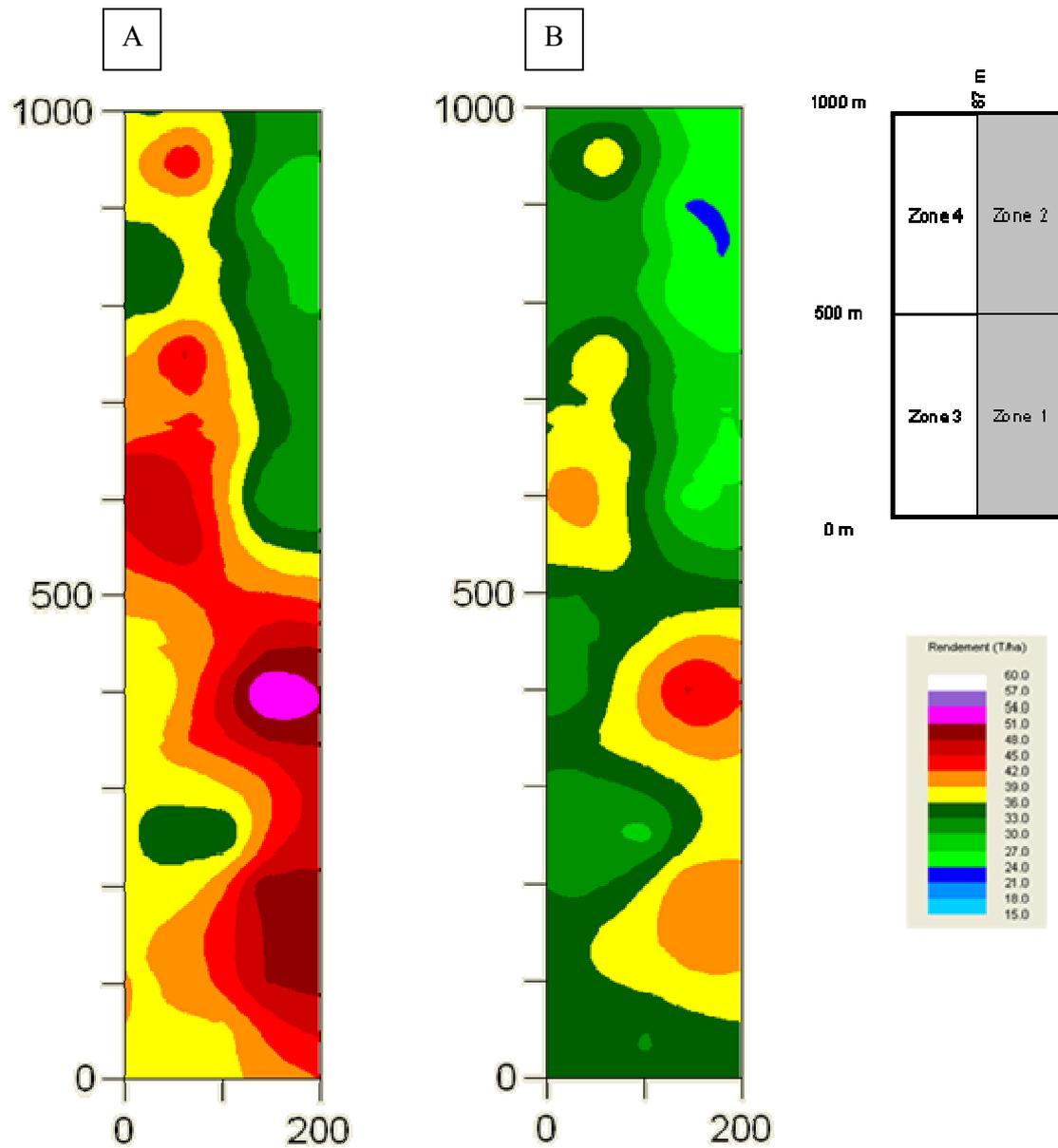


Figure 11. Distribution des rendements totaux (A) et vendables (B) en 2010 (t/ha)

4.1.4 Améliorer l'efficacité du rapport volume d'eau appliqué/kg de pomme de terre produit grâce à une gestion locale de l'irrigation

En 2008, le premier cycle d'irrigation a débuté le 25 août, soit 104 jours après la plantation et le troisième et dernier cycle s'est terminé le 2 septembre, soit 21 jours avant la récolte des tubercules. Ainsi, l'apport en eau par l'irrigation n'a été nécessaire que durant une période de neuf jours, les précipitations ayant généralement été abondantes (Figure 12). En 2010, cinq cycles d'irrigation ont été complétés. Ces derniers ont respectivement été effectués le 13, 21 et 30 juillet, ainsi que le 11 et 25 août. Les précipitations mesurées sont présentées à la Figure 13.

En calculant le nombre de litres d'eau qui ont été appliqués pour 1 kg de tubercules récoltés, une mesure d'efficacité d'utilisation de l'eau a été obtenue. Ainsi, le volume d'eau appliqué spécifiquement aux 30 sites de suivi a été comparé au rendement obtenu pour les sites correspondants. En 2008, le nombre de litres d'eau appliqué par l'irrigation pour 1 kg de tubercules récoltés était respectivement de 16,4 et 18,9 pour les zones 1 et 2 (gestion locale) et de 19,5 et 18,0 pour les zones 3 et 4 (gestion globale) (Tableau 8). En 2010, le nombre d'épisodes étant supérieur à celui de 2008, les quantités sont plus élevées, soit respectivement 23,9 et 32,2 l/kg pour les zones 1 et 2 et respectivement 28,3 et 25,7 l/kg pour les zones 3 et 4.

Quelle que soit la saison, chacun des types de gestion doit composer avec une zone plus productive en tubercules que l'autre. Les rendements obtenus demeurent étroitement reliés aux patrons d'humidité. Toutefois, pour les zones 1 et 3, qui étaient respectivement sous gestion locale et globale, où les rendements vendables étaient comparables, l'efficacité d'utilisation de l'eau a semblé plus élevée avec la gestion locale.

Tableau 8. Litres d'eau utilisés par kg de tubercules récoltés selon le type de gestion.

Zone	Type de gestion	Volume d'eau par unité produite (l/kg)			
		2008		2010	
		Rdt tot.	Rdt vend.	Rdt tot.	Rdt vend.
1	Locale	13,0	16,4	20,2	23,9
2		15,1	18,9	26,0	32,2
3	Globale	16,1	19,5	24,8	28,3
4		14,7	18,0	22,2	25,7

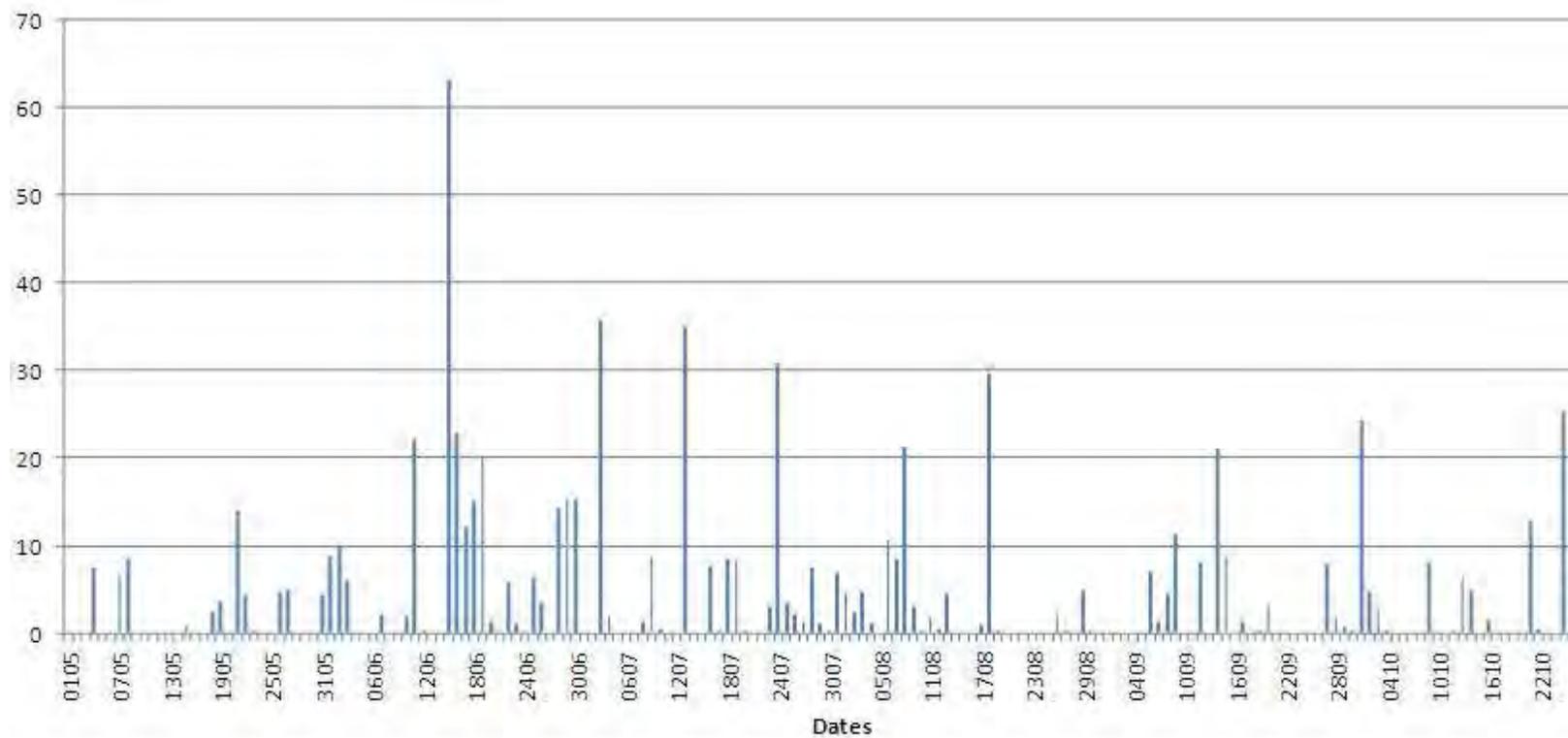


Figure 12. Précipitations mesurées (mm) sur le site entre le 1^{er} mai et le 28 octobre 2008.

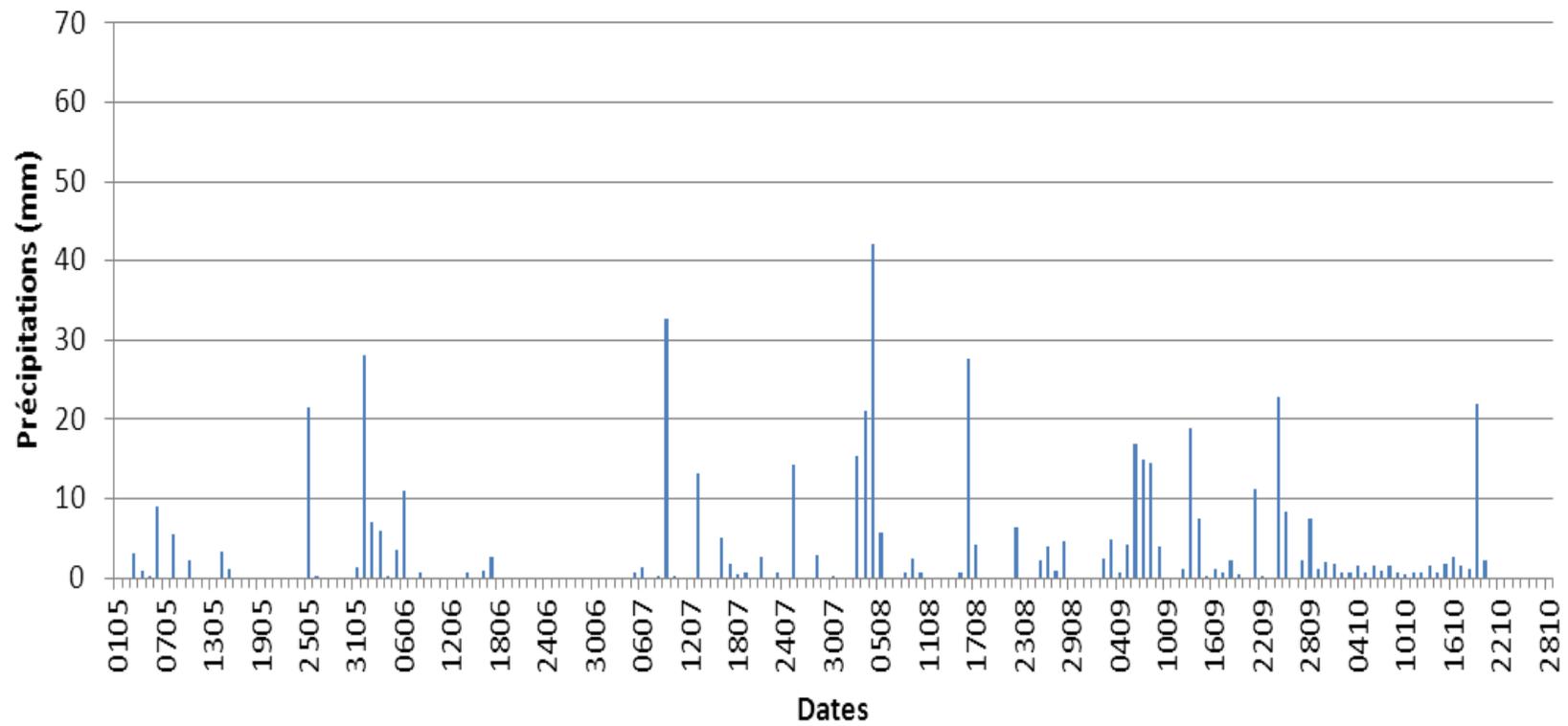


Figure 13. Précipitations mesurées (mm) sur le site entre le 1^{er} mai et le 28 octobre 2010.

4.1.5 Déterminer la faisabilité économique d'une gestion locale de l'irrigation

Il y a deux principaux facteurs dans l'adoption de l'une ou l'autre des deux approches de gestion de l'irrigation, qui pourraient avoir des conséquences économiques potentiellement importantes. Ces facteurs sont l'équipement nécessaire pour mesurer le potentiel hydrique du sol et la vitesse d'avancement de la rampe d'irrigation. La vitesse d'avancement de la rampe est un facteur limitatif important de la superficie en culture qu'il est possible d'irriguer sans que cette dernière ne subisse de stress hydrique. Dans le contexte où le système d'irrigation était utilisé, la vitesse d'avancement était régie par la hauteur d'eau que l'on voulait appliquer. Le tableau suivant présente le nombre d'heures nécessaires pour irriguer une superficie de 10 ha, soit sur une distance longitudinale de 1000 m pour une portée latérale de 100 m (largeur de la rampe). Ainsi, pour appliquer une hauteur d'eau de 19 mm, soit la hauteur d'eau appliquée lors d'un épisode d'irrigation sous gestion globale, il faut compter 33 heures, alors que ce nombre diminue à 29 heures pour appliquer 16 mm. À titre comparatif, avec la gestion locale, la hauteur d'eau moyenne apportée lors d'un épisode d'irrigation était respectivement de 15,5 et 17,1 mm, en 2008 et 2010.

Tableau 9. Durée d'un épisode d'irrigation selon la hauteur d'eau appliquée pour 1000 mètres linéaires de champ avec une rampe ayant une portée de 100 mètres latéralement (10 ha).

Hauteur d'eau appliquée (mm)	Nombre d'heures
19	33
16	29
13	25
10	20

Il est davantage possible de diminuer le nombre d'heures pour irriguer une même superficie avec la gestion locale, comparativement à celle globale. Ce gain en temps permet d'irriguer davantage de superficies sans avoir à acquérir une rampe supplémentaire ou d'augmenter le temps de pompage. En 2007, les coûts reliés à l'achat d'un enrouleur et d'une rampe, telle que celle utilisée dans ce projet, étaient d'environ 90 000 \$. Cette capacité de couverture supplémentaire est importante dans un contexte de production où l'irrigation permet d'améliorer la rentabilité économique. Quoiqu'aucun témoin non irrigué n'était présent dans ce projet, différentes études ont déjà démontré la rentabilité économique de l'irrigation dans la pomme de terre (Tichoux, 1999; BPR, 2008 et Boivin et Landry, 2011).

Maintenant, tenir compte des patrons d'humidité requiert des équipements de mesure du statut hydrique du sol, tels que des tensiomètres. Dans l'étude réalisée en 2007, le nombre de tensiomètres nécessaire pour être en mesure de considérer les patrons de façon efficace était de un par hectare. Donc, pour une entreprise de 100 ha où il faudrait 100 tensiomètres à 900 \$ chacun, le coût deviendrait rapidement prohibitif. Il est plus facile

de justifier ces investissements dans des cultures telles que la fraise où les revenus par unité de surface sont beaucoup plus élevés que dans la pomme de terre. Toutefois, les patrons sont constants dans le temps. Conséquemment, même si le statut hydrique du sol varie constamment, une fois caractérisé adéquatement, seulement quelques tensiomètres pourraient être utilisés dans des zones ciblées afin de déterminer la hauteur d'eau à appliquer.

Quoique la gestion locale n'ait pas permis d'augmenter les rendements vendables dans les zones du champ, ces derniers étaient plus faibles, la démonstration suivante évalue les montants générés par des gains potentiels en rendements qui pourraient être affectés à l'achat d'équipements supplémentaires. La démonstration est basée sur le budget publié par les références économiques du CRAAQ en 2010 (AGDEX 258/821h) où il est question d'une entreprise produisant 80 ha en pommes de terre avec un rendement vendable de 28 t/ha et un prix pondéré de 258 \$/t pour un bénéfice net de 156 455\$. Donc, avec un rendement de référence établi à 28 t/ha, chaque tonne supplémentaire améliore le bénéfice net d'environ 20 611\$ ou 257 \$/ha.

4.2 Diffusion des résultats

Activités prévues	Activités réalisées pour la période couverte par le rapport	Description (thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Visibilité accordée au CDAQ et à AAC (logo, mention)
Présentation générale du projet	http://www.irda.qc.ca/fr/Liste-des-projets-en-cours/197	Site Web de l'IRDA	Pour la durée du projet	Variable	Mention
Fiche technique	Présentation et démarrage du projet :	Site Web de l'IRDA et d'Agri-Réseau http://www.irda.qc.ca/documents/Results/156.pdf	Juillet 2008	Variable	Logo, mention
Journée de démonstration de type portes ouvertes	Portes ouvertes 2008	Feuillet informatif remis aux participants de la journée portes ouvertes 2008 à Deschambault.	10 juillet 2008	+/- 100	Logo, mention
Rapport d'étape	Dépôt du rapport d'étape au CDAQ	Présentation de l'avancement des résultats	Mars 2010	Variable	Logo, mention
Conférences	Capsule au colloque sur l'irrigation en horticulture, CRAAQ	Hôtel Universel Best Western, Drummondville	25 novembre 2010	+/- 100	Logo
	Journée régionale en production de pommes de terre, MAPAQ Bas St-Laurent	Hôtel Universel, Rivière-du-Loup	18 février 2011	+/- 50	Logo

Activités prévues	Activités réalisées pour la période couverte par le rapport	Description (thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Visibilité accordée au CDAQ et à AAC (logo, mention)
Rédaction du texte du cahier de conférence du colloque en irrigation	http://www.agrireseau.qc.ca/pdt/navigation.aspx?sid=1004&pid=331&r=	Cahier de conférence, site Web d'Agri-Réseau	Déposé en ligne le 22 décembre 2010	Variable	Logo, mention
Rapport final		Site Web de l'IRDA et d'Agri-Réseau	Avril 2012	Variable	Logo

5 CONCLUSION

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude démontrent que les conditions hydriques du sol ont bel et bien influencé la productivité de la culture et le devenir de l'azote. Toutefois, l'utilisation d'une gestion locale des apports en eau par l'irrigation, basée sur les patrons d'humidité du sol du site, n'a pas permis d'uniformiser les différences de rendements et de prélèvements en azote de la culture et les risques de lessivage des nitrates. En 2008, cette situation était prévisible, car la majeure partie de la saison s'est déroulée sans irrigation. Toutefois, en 2010, avec 5 cycles d'irrigation, dont le premier dès le 13 juillet, des différences de rendements auraient pu être trouvées, mais le constat demeure le même. Ainsi, le type de gestion n'a pas réussi à compenser pour les patrons d'humidité du sol qui se sont avérés très forts et persistants. D'ailleurs, à ce niveau, les résultats de plusieurs mesures sont similaires selon les zones étudiées pour les deux années, indiquant la permanence de l'impact des patrons.

Quoi qu'il en soit, le regroupement des données des 30 points de mesures selon 4 grandes zones a permis de faire ressortir que la zone la plus humide est aussi celle où les prélèvements en azote et les rendements étaient les plus faibles, avec l'indice de gale le plus élevé. C'est aussi cette zone qui présentait la plus grande susceptibilité au lessivage des nitrates. En effet, en 2008, les prélèvements totaux en N par la culture dans cette zone étaient de 27 à 42 kg ha⁻¹ de moins que les quantités prélevées dans les autres zones. En 2010, cette situation s'est maintenue et 30 à 63 kg supplémentaires de N sont restés non prélevés au champ dans cette zone, comparativement au reste du champ. Au final, pour les deux années, ces différences s'avèrent importantes en termes de risques accrus de perte de nitrate dans le milieu récepteur et suggèrent l'importance que revêt la gestion de l'état hydrique des sols en culture, en regard de cette problématique.

Enfin, d'un point de vue économique, l'approche locale a permis d'utiliser moins d'eau par épisode d'irrigation pour des rendements similaires. En termes de hauteur d'eau moyenne par épisode, la gestion globale apportait 19 mm et la gestion locale 15,5 et 17,1 mm en 2008 et 2010, respectivement. Avec la rampe utilisée, il fallait alors 33 heures pour apporter les 19 mm sur un champ de 1000 mètres linéaires (10 ha), comparativement à 29 h pour l'application de 16 mm. Avec la gestion locale, davantage de superficies peuvent donc bénéficier de l'irrigation, sans devoir pour autant augmenter le temps de pompage ou acquérir une rampe supplémentaire. Il est vrai cependant que tenir compte des patrons d'humidité requiert des équipements de mesure du statut hydrique du sol, tels que des tensiomètres, dont le coût doit être pris en compte. Ce coût peut devenir significatif puisque dans les conditions de l'étude, l'utilisation d'un tensiomètre par hectare s'est avérée nécessaire. Un tel investissement serait probablement plus facile à justifier dans des cultures telle que la fraise, où les revenus par unité de surface sont beaucoup plus élevés. Toutefois, puisque la distribution des patrons est constante dans le temps, une fois ceux-ci caractérisés adéquatement, seulement quelques tensiomètres pourraient être utilisés dans des zones ciblées afin d'orienter la hauteur d'eau à appliquer.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier messieurs Victorin et Norbert Drolet de la Ferme Victorin Drolet inc., et M. Jean Noreau du MAPAQ, pour leur collaboration au projet. Nos remerciements s'adressent également à l'équipe d'Aubert Michaud et aux ouvriers de la station de recherche de Deschambault et celle de Saint-Lambert pour leur collaboration, de même qu'aux entreprises HORTAU et Dubois Agrinovation pour leur soutien technique et leur participation financière au projet.

Enfin, la réalisation de ce projet a été rendue possible grâce à la contribution financière du Programme pour l'avancement du secteur canadien de l'agriculture et de l'agroalimentaire (PASCAA). Ce programme d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) est livré par l'intermédiaire du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ).

7 BIBLIOGRAPHIE

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

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.

BPR, 2008. Solutions techniques visant l'approvisionnement en eau des cultures horticoles à l'Île-d'Orléans, Projet no R99-07-03.

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

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

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.

Isaaks, E.H. et R.M. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics, Oxford University Press, New York.

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.

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

Tichoux, H. 1999. Model comparison of three irrigation systems for potato production in Quebec. Thèse de maîtrise, Department of agricultural and biosystems engineering, Macdonald Campus, McGill University, Montréal, Québec, Novembre.

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. Chapitre 6. *Dans* M.R. Carter (ed.) *Soil sampling and methods of analysis.* Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, Florida. Pages 43-49.

8 ANNEXE

8.1 Photos



Figure 14. État de la culture au 14 juillet 2008



Figure 15. La rampe d'irrigation et l'enrouleur (25 août 2008).



Figure 16. Échantillonnage de sol le 19 septembre 2008.



Figure 17. Échantillonnage de sol le 19 septembre 2008.

8.2 Rapport du projet réalisé en 2007

Étude d'acquisition de connaissances sur la détermination de l'existence de patrons éventuels d'assèchement ou d'humidité dans un sol agricole en relation avec le rendement en pommes de terre et la perte des nitrates

PAECQ 5218

Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec

Rapport final



Mars 2007 à mars 2008

Carl Boivin, chercheur, agr., M.Sc. – IRDA
Christine Landry, chercheure, biologiste, agr., M.Sc. – IRDA
Jean Caron, chercheur, agr., Ph.D. – Université Laval

Avec la collaboration de
Julie Mainguy, professionnelle de recherche, agr. – IRDA
Danièle Pagé, t.a. – IRDA
Daniel Bergeron, conseiller horticole, agr. – MAPAQ

Mai 2008

PROGRAMME D'APPROVISIONNEMENT EN EAU CANADA-QUÉBEC

Ce programme est issu du Cadre stratégique pour l'agriculture.



Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Agriculture and
Agri-Food Canada

Agriculture, Pêcheries
et Alimentation

Québec



Pour plus d'information



www.cdag.qc.ca

Table des matières

1	DESCRIPTION DU PROJET	4
1.1	INTRODUCTION	5
1.2	OBJECTIF GÉNÉRAL.....	6
1.3	OBJECTIFS SPÉCIFIQUES	6
1.4	ATTEINTE DES OBJECTIFS.....	7
1.5	ÉTAPES ET ÉCHÉANCES	9
2	RÉSULTATS ET ANALYSES	10
2.1	MISE EN PLACE DE L'EXPÉRIENCE.....	10
2.2	DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	10
2.3	COLLECTE DES DONNÉES	12
2.4	ANALYSE DES DONNÉES	13
2.5	RÉSULTATS OBTENUS POUR LA SAISON 2007 SELON LES OBJECTIFS SPÉCIFIQUES	14
2.5.1	<i>Déterminer si les patrons de variabilité observés correspondent à une distribution aléatoire du potentiel hydrique ou s'ils reflètent une structure spatiale constante, correspondant à des variations de texture du sol ou d'élévation du relief.</i>	<i>14</i>
2.5.2	<i>Cartographier les zones d'irrigation dites sèches, moyennes et intermédiaires dans un champ donné.</i>	<i>19</i>
2.5.3	<i>Relier les patrons d'humidité observés aux rendements en pommes de terre.</i>	<i>22</i>
2.5.4	<i>Évaluer le nombre minimal de tensiomètres requis pour détecter un stress hydrique avec une précision de 5%.</i>	<i>25</i>
2.5.5	<i>Établir un lien de cause à effet entre la variabilité de la teneur en eau d'un champ et la descente des nitrates au travers du profil de sol par lessivage.</i>	<i>26</i>
2.5.6	<i>Étudier l'impact possible des zones de variabilité sur la qualité des tubercules incluant le poids spécifique, le contenu en nitrates et les taux de maladies fongiques, telles la rhizoctonie et la gale.</i>	<i>30</i>
2.5.7	<i>Vérifier l'impact économique d'une telle pratique en estimant les pertes de revenus engendrées par les baisses de rendements occasionnées par les zones de variabilité en humidité du sol.</i>	<i>31</i>
2.5.8	<i>Acquérir les connaissances préalables à la rationalisation adéquate de l'application de l'eau en fonction des zones sèches ou humides existantes dans un champ donné dans le but d'uniformiser la teneur en eau du champ et, incidemment, les rendements en pommes de terre.</i>	<i>31</i>
3	IMPACT	42
3.1	IMPACT SUR LE SECTEUR	42
3.2	PÉRENNITÉ DU PROJET	42
4	REMERCIEMENTS	43
5	RÉFÉRENCES	43
6	PLAN DE FINANCEMENT ET CONCILIATION DES DÉPENSES	43

Liste des figures

Figure 1. Carte satellite du champ à l'étude où les sites de mesures de la tension de l'eau dans le sol sont indiqués par un point jaune.	11
Figure 2. Variogramme anisotrope pour la période (1 ^{ère}) sèche du mois d'août.	15
Figure 3. Variogramme anisotrope pour la période (2 ^e) humide du mois d'août.	15
Figure 4. Variogramme anisotrope pour la période (3 ^e) près de la capacité au champ du mois de septembre.	16
Figure 5. Rétenion en eau du sol par l'argile.	18
Figure 6. Cartographie des zones d'humidité pour la période dite humide (2 à 8 kPa).	20
Figure 7. Cartographie des zones d'humidité pour la période dite sèche (7 à 13 kPa).	20
Figure 8. Cartographie des zones d'humidité pour la période près de la capacité au champ en septembre (2 à 8 kPa).	21
Figure 9. Relation entre la tension de l'eau dans le sol et le rendement vendable mesuré pour les sites de mesures T1 à T10.	23
Figure 10. Cartographie des diverses zones de rendement vendable ($T\ ha^{-1}$).	24
Figure 11. Cartographie des zones de tension de l'eau dans le sol pour la période dite humide (kPa).	24
Figure 12. Teneurs en nitrates au travers du profil de sol en cours de saison.	27
Figure 13. Courbes de conductivité hydraulique non saturée, échantillon T5A500.	35
Figure 14. Courbes de rétention d'eau en désorption et sorption représentatives pour le champ à l'étude.	37
Figure 15. Direction de l'écoulement des eaux de surface en condition de sol saturée.	39
Figure 16. Relevé topographique du champ à l'étude.	40
Figure 17. Pluviométrie mesurée sur le site à l'étude du 25 mai au 30 juin 2007.	44
Figure 18. Pluviométrie mesurée sur le site à l'étude en juillet 2007.	44
Figure 19. Pluviométrie mesurée sur le site à l'étude en août 2007.	45
Figure 20. Pluviométrie mesurée sur le site à l'étude en septembre 2007.	45
Figure 21. Pluviométrie mesurée sur le site à l'étude du 1 ^{er} au 17 octobre 2007.	46
Figure 22. Champ à l'étude.	47
Figure 23. Tensiomètre sans fil (Hortimètre T-80).	47

Liste des tableaux

Tableau 1. Coefficient de corrélation (r) entre la tension en eau du sol et le taux de matière organique, la texture du sol et la topographie du champ à l'étude.....	18
Tableau 2. Coefficient de corrélation (r) entre les rendements et la tension de l'eau dans le sol.	22
Tableau 3. Détermination du nombre de tensiomètres nécessaires pour obtenir le niveau de confiance souhaitée.	25
Tableau 4. Coefficient de corrélation (r) entre le contenu en nitrates au travers du profil de sol et la teneur en eau du sol au cours des cinq périodes étudiées.....	26
Tableau 5. Corrélation entre le contenu en nitrates au travers du profil de sol et certains paramètres de sol en cours de saison.....	29
Tableau 6. Coefficient de corrélation (r) entre la tension en eau du sol et la qualité des tubercules.	30
Tableau 7. Propriétés physiques des échantillons de sol prélevés en 30 points dans le champ....	32

Liste des annexes

ANNEXE 1. Pluviométrie.....	44
ANNEXE 2. Photos	47

1 DESCRIPTION DU PROJET

1.1 Introduction

La culture de la pomme de terre s'effectue généralement en sols légers, c'est-à-dire sur des sols qui contiennent une forte proportion de sable. Ceux-ci sont plus susceptibles à la sécheresse en raison d'une faible capacité de rétention en eau qui découle de leur capacité de drainage plus élevée. La teneur en eau de ces sols peut ainsi devenir rapidement un facteur limitant pour le développement de la plante lorsque l'eau disponible est insuffisante, ou être une source de pollution diffuse lorsque sa teneur dépasse la capacité de rétention du sol en eau. Par exemple, ces sols présentent un risque plus élevé de perte en éléments fertilisants, tel que le N, principalement via le lessivage des nitrates. Puisque la modification des caractéristiques physiques d'un sol n'est guère envisageable et considérant le temps nécessaire pour engendrer des changements, intervenir sur la régie de culture demeure la meilleure option à court terme.

La pratique de l'irrigation s'inscrit dans cette lignée. En contrepartie de ses bienfaits, elle consomme cependant une grande quantité d'eau douce. Il est donc important d'en faire une utilisation rationnelle et d'éviter toute surconsommation. La gestion optimale de l'irrigation ne peut toutefois être généralisée d'un endroit à un autre car elle est influencée par maints facteurs tels le climat, les types de cultures et les singularités propres à chaque région.

La gestion de la quantité d'eau appliquée est un paramètre déterminant de l'efficacité de l'irrigation. Idéalement, la décision de démarrer l'irrigation devrait être basée sur des mesures effectuées directement sur les plantes, ce qui est cependant trop complexe et coûteux en contexte de production commerciale. De façon plus efficiente, cette décision peut toutefois se baser sur des mesures de disponibilité de l'eau dans le sol. Les mesures prises avec des tensiomètres sont depuis longtemps perçues comme la meilleure estimation de disponibilité de l'eau du sol à la plante (Taylor, 1965; Kramer, 1983) et offre ainsi une méthode de gestion de l'irrigation facilement utilisable en contexte de production commerciale. Cette gestion sera d'autant plus efficace, qu'il sera déterminé si des zones sèches ou humides existent dans un champ donné ou si, au contraire, la variation d'humidité est aléatoire.

En effet, l'efficacité de l'irrigation dépend directement de la détermination adéquate du niveau d'humidité du sol pour démarrer l'irrigation. Un départ en conditions trop humides de sol peut entraîner des lessivages à l'excès des nutriments, tandis que des conditions trop sèches occasionnent des pertes de rendement. C'est pourquoi ce projet s'est intéressé à la reconnaissance de la variabilité spatiale des sols à l'intérieur d'un même champ, ce qui permettra au producteur d'ajuster le temps d'irrigation selon les zones ciblées et de réduire ainsi les volumes d'eau appliquée à l'échelle du champ.

1.2 Objectif général

Le projet vise à vérifier l'existence de patrons éventuels d'assèchement ou d'humidité dans un sol agricole en production de pommes de terre irriguées et de relier ces patrons aux rendements et aux mouvements des nitrates dans le profil de sol. Ce projet s'inscrit dans une démarche qui vise une utilisation optimale de l'eau et, conséquemment, des fertilisants par la plante dans un souci de production durable.

1.3 Objectifs spécifiques

- Déterminer si les patrons de variabilité du potentiel hydrique observés correspondent à une distribution aléatoire ou s'ils reflètent une structure spatiale constante, correspondant à des variations de texture du sol ou d'élévation du relief.
- Cartographier les zones d'irrigation dites sèches, moyennes et intermédiaires.
- Vérifier le lien entre les patrons de variabilité du potentiel hydrique aux rendements en pommes de terre.
- Évaluer le nombre minimal de tensiomètres requis pour détecter un stress hydrique avec une précision de 5%.
- Établir un lien de cause à effet entre la variabilité de la teneur en eau d'un champ et la descente par lessivage des nitrates au travers du profil de sol.
- Étudier l'impact possible des zones de variabilité sur la qualité des tubercules incluant le poids spécifique, le contenu en nitrates et les taux de maladies telles la rhizoctonie et la gale.
- Vérifier l'impact économique de la tenu en compte des patrons de variabilité du potentiel hydrique en estimant les pertes de revenus engendré par les baisses de rendements occasionnées par les zones de variabilité en humidité du sol.
- Acquérir les connaissances préalables à la rationalisation adéquate de l'application de l'eau en fonction des zones sèches ou humides existantes dans un champ dans le but d'uniformiser la teneur en eau du champ et, incidemment, de maximiser les rendements en pommes de terre.

1.4 Atteinte des objectifs

La présence d'une structure spatiale constante des patrons d'humidité du sol a permis l'atteinte des objectifs fixés, ce qui aurait été impossible si les patrons de variabilité observés s'étaient plutôt apparentés à une distribution aléatoire du potentiel hydrique. Ces patrons, en périodes dites sèches, humides et à capacité au champ, sont illustrés aux figures 6 à 8.

L'analyse des patrons dans le temps a permis dans un premier temps d'évaluer l'étendue des zones similaires, c'est-à-dire où la tension de l'eau dans le sol est comparable. En conditions plus sèches de sol, les zones qui se ressemblent sont à l'intérieur d'un rayon plus grand qu'en conditions de sol humides, soit respectivement 400 et 200 m (figures 2 et 3). Pour expliquer la présence de ces patrons, la texture du sol, le taux de matière organique et la topographie du terrain ont été mis en relation avec les mesures de tension de l'eau dans le sol effectuées à différentes périodes de la saison. Parmi ces variables, la relation entre la tension de l'eau dans le sol et la proportion de sable et d'argile dans le sol s'est avérée significative, soit un coefficient de corrélation (r) de 0,381 pour le sable ($P = 0,038$) et de 0,344 pour l'argile ($P = 0,063$). Concrètement, en ce qui a trait à la période dite sèche, plus la proportion de sable est élevée et celle en argile faible dans une zone donnée, plus la tension de l'eau y est élevée (sec).

La connaissance de l'étendue de ces zones est utile pour évaluer le nombre de tensiomètres requis pour détecter un stress hydrique avec une précision donnée. Cependant, il est impératif de connaître les rendements en tubercules afin de déterminer si ces derniers sont en relation avec les patrons observés. Les analyses statistiques effectuées révèlent qu'il existe une relation significative entre les rendements vendables et les patrons d'humidité, soit un coefficient de corrélation (r) de 0,373 ($P = 0,042$) pour l'ensemble du champ et ce coefficient atteint un sommet de 0,61 ($P = 0,06$) pour la zone représentée par les sites T1 à T10 (figure 1). À partir de ces résultats, il a été possible d'estimer la perte de rendements liée à une variation de la tension de l'eau dans le sol. En effet, la chute d'une unité de tension (1 kPa), c'est-à-dire des conditions d'humidité de sol qui augmentent, est corrélée avec une diminution de rendement de 3,3 T ha⁻¹. Donc, pour détecter un stress hydrique avec une précision de 5% ou de 10 %, le nombre de tensiomètres à utiliser pour ce champ est respectivement de 4 et 5 unités pour une superficie de 4 ha (tableau 3).

Ce projet s'inscrit également dans une démarche qui vise une utilisation optimale de l'eau et conséquemment, des fertilisants par la plante. C'est pourquoi un des objectifs était de vérifier s'il existait un lien entre les patrons d'humidité et la descente par lessivage des nitrates au travers du profil du sol. De prime abord, les résultats de cette première année d'étude ne font ressortir aucun lien entre la teneur en nitrates mesurée au travers du profile de sol dans les trois strates étudiées et la teneur en eau du sol mesurée par les tensiomètres (tableau 4). En fait, bien qu'aucune tendance générale ne se soit dessinée pour l'ensemble de la saison, pour les périodes de juin et juillet, alors que la croissance des plants est très active, l'emplacement dans le champ semble toutefois avoir été déterminant. En effet, les teneurs en nitrates de la zone utile de sol étaient jusqu'à 1,8 fois plus élevées dans la deuxième moitié du champ, allant du 500^e-1000^e m, que dans la première partie (50^e-500^e m), sans égard au taux d'humidité du sol.

Le suivi en profondeur des teneurs en nitrates au travers du profil de sol en fonction du temps a cependant permis de bien faire ressortir la hausse des teneurs en nitrates en juin et juillet dans la couche de surface (0-30 cm) du sol où la culture puise son azote, suivi quelques semaines plus tard d'une descente marquée des nitrates dans la strate subséquente (30-60 cm) de sol (figure 12). Afin de tenter de comprendre l'absence de lien entre les patrons d'humidité et les teneurs en nitrates, une analyse de corrélation a été effectuée entre certains paramètres de sol et les teneurs en nitrates (tableau 5). Cette analyse a révélé de forts liens entre les teneurs en nitrates et, principalement, les contenus en sables et en argiles du sol.

Dans un même ordre d'idées, vérifier s'il existe une relation entre les zones de variabilité de l'humidité du sol et la qualité des tubercules a permis d'établir un lien entre l'humidité du sol et l'incidence de la gale. La présence de cette relation, en plus de celle existant entre les patrons d'humidité et le rendement vendable, laisse envisager un impact économique positif de la gestion de l'eau selon les patrons existants par l'uniformisation de l'humidité du sol à l'échelle du champ, sujet d'un second projet qui débutera au printemps 2008.

Dans cette prochaine étude, alimentée par les résultats obtenus dans le présent projet, la gestion de l'irrigation sera effectuée selon deux approches, soit l'une globale et la seconde dite locale. En effet, en 2007, le champ à l'étude sera séparé longitudinalement en deux sections afin de comparer ces deux approches en ce qui a trait aux rendements et à la perte des nitrates. Une rampe d'irrigation permettant l'application d'eau à taux variable sera utilisée. C'est pourquoi l'acquisition de connaissances reliées aux caractéristiques physiques du sol était nécessaire. Conséquemment, les courbes de conductivité hydraulique non saturée et de rétention en eau ont été établies à partir des échantillons prélevés aux 30 sites de mesures de tension, identifiés à la figure 1. À partir de ces données, il a été possible d'estimer la réserve facilement utilisable en eau (RFU) moyenne pour ce champ qui est de 6 mm d'eau pour 30 cm de sol. Ainsi, lorsque l'irrigation est déclenchée au point de flétrissement temporaire (PFT), qui est d'environ 7,5 kPa en moyenne pour ce champ, les 30 premiers centimètres de sol sont en mesure de retenir 6 mm d'eau (figure 13). En théorie, tout apport supérieur à 6 mm sera donc lessivé, devenant inaccessible pour les racines. De plus, la teneur moyenne en air de ce sol est de 29 %, indiquant que les diminutions de rendement dans certaines parties du champ ne seraient pas dues à un problème de structure. Les rendements plus faibles seraient plutôt attribuables à un excès d'humidité dû à un apport excédentaire d'eau par la pluie et/ou l'irrigation (tableau 7).

1.5 Étapes et échéances

Activité réalisée	Date prévue	Date réelle	Finalité	Notes
Rencontre avec le producteur	Février 2007	Avril 2007	Explication du projet, entente financière.	
Présentation des étapes de réalisation au producteur	Avril 2007	Avril 2007	Approbation de l'échéancier, information sur les interventions au champ.	<i>L'échéancier convient aux participants</i>
Embauche d'une professionnelle de recherche	Mai 2007	1 ^{er} mai 2007	Agira à titre d'assistante.	
Mise en place du dispositif	Mai 2007	Mai 2007	Répartition des 20 ha du champ en 30 zones de mesures du potentiel hydrique hydriques.	
Installation des 30 tensiomètres	9 mai 2007	29 mai 2007	Suivi en continu de la disponibilité en eau dans les 30 zones de mesures.	<i>Un tensiomètre/zone de mesure</i>
Conduite des essais et collecte des données	Mai – sept. 2007	Mai – oct. 2007	Caractérisation du sol (granulométrie, pH, MO, N-NO ₃ , N-NH ₄ ...), nutrition des plants et calcul du bilan azote sol-plante, détermination de la tension correspondant à une teneur en eau égale à 65% de la RFU du sol.	<i>Prélèvements de sols et de végétaux à des stades cibles de la croissance des plants, prélèvement de cylindres de sols pour l'établissement des courbes</i>
Soumission des demandes d'analyses au laboratoire des sols	Juin – oct. 2007	Juin – oct. 2007	Analyse et traitement des données.	
Évaluation qualité tubercules et rendement	Octobre 2007	Oct.-nov. 2007	Qualité, classement, maladies.	<i>Gale commune et rhizoctonie</i>
Positionnement géo-satellite des tensiomètres	Août 2007	Septembre 2007	Repositionnement au même endroit pour les années subséquentes.	
Prise du relevé topographique	Septembre 2007	Octobre 2007	Connaître la topographie et l'écoulement des eaux et l'élévation du champ.	
Compilation et interprétation données	Déc. 2007	Déc.-mars 2008	Rédaction rapport finale CDAQ.	
Rédaction rapport final CDAQ	Février 2008	Fév.-mars 2008	Remise du rapport au CDAQ.	

Toutes les activités se sont déroulées comme prévues, bien que certaines aient nécessité de légères modifications, notamment en ce qui a trait au type de tarière utilisée. L'acquisition de matériel plus performant et la modification des embouts des tarières ont facilité les prélèvements dans les strates profondes et ont donc permis de maintenir la cédule d'échantillonnages multiples prévue et à la profondeur souhaitée. Les tensiomètres ont également exigé certains ajustements en cours de saison, plus spécifiquement pour régler un problème de transmission des données et de déchargement de tensiomètres, dû à la faible teneur en eau du sol au début du mois d'août.

2 RÉSULTATS ET ANALYSES

2.1 Mise en place de l'expérience

Le projet, d'une durée de un an, s'est déroulé chez un producteur de pommes de terre de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier, en contexte de production commerciale et selon la régie de culture du producteur. La plantation (cv *Russet Burbank*) a été effectuée le 14 mai, à une densité de 27 340 plants ha⁻¹. Le champ, d'une superficie de 20 hectares, a été divisé en 30 zones de mesure. Dans les différentes zones, le pH du sol variait de 5,4 à 6,5 et le taux de matière organique de 2,7 à 5,9. Dans la couche cultivée, la texture oscillait entre le loam sableux et le sable, avec prédominance pour le sable. Dans les strates plus profondes, la texture rapportée était un sable grossier. Les 30 tensiomètres ont été installés le 29 mai, à raison d'un tensiomètre par zone. Enfin, la récolte des 30 parcelles s'est effectuée le 21 septembre.

2.2 Dispositif expérimental

La présente étude ne comprenant aucune assignation de traitement, un échantillonnage systématique du champ a été réalisé afin de caractériser l'ensemble du site dans le but, entre autres, de choisir un dispositif qui sera adéquat pour l'initiation de la seconde phase du projet qui a trait au développement d'une gestion de l'irrigation dite de précision. La technique de détermination des zones d'échantillonnage fait appel aux géostatistiques. Nous avons suivi la méthode proposée par Isaaks et Srivastava (1989), laquelle consiste à placer un nombre minimal de 30 points de mesures à l'intérieur d'une surface donnée, d'en recueillir les données et à procéder à leur analyse par variographie et krigeage.

La position géographique des 30 tensiomètres dans le champ à l'étude est indiquée par les points jaunes à la figure 1, lesquels ont été distribués sur quatre rangées longitudinales situées aux rangs 35, 79, 150 et 157. La première et la dernière rangée comprennent un tensiomètre à tous les 100 m et les deux rangées centrales à tous les 200 m. Les tensiomètres sont nommés selon leur ordre (T1 à T30), longitudinalement selon la distance qui les sépare du début du champ (100 à 1000 m) et aussi selon leur position en largeur (A, B, C et D).

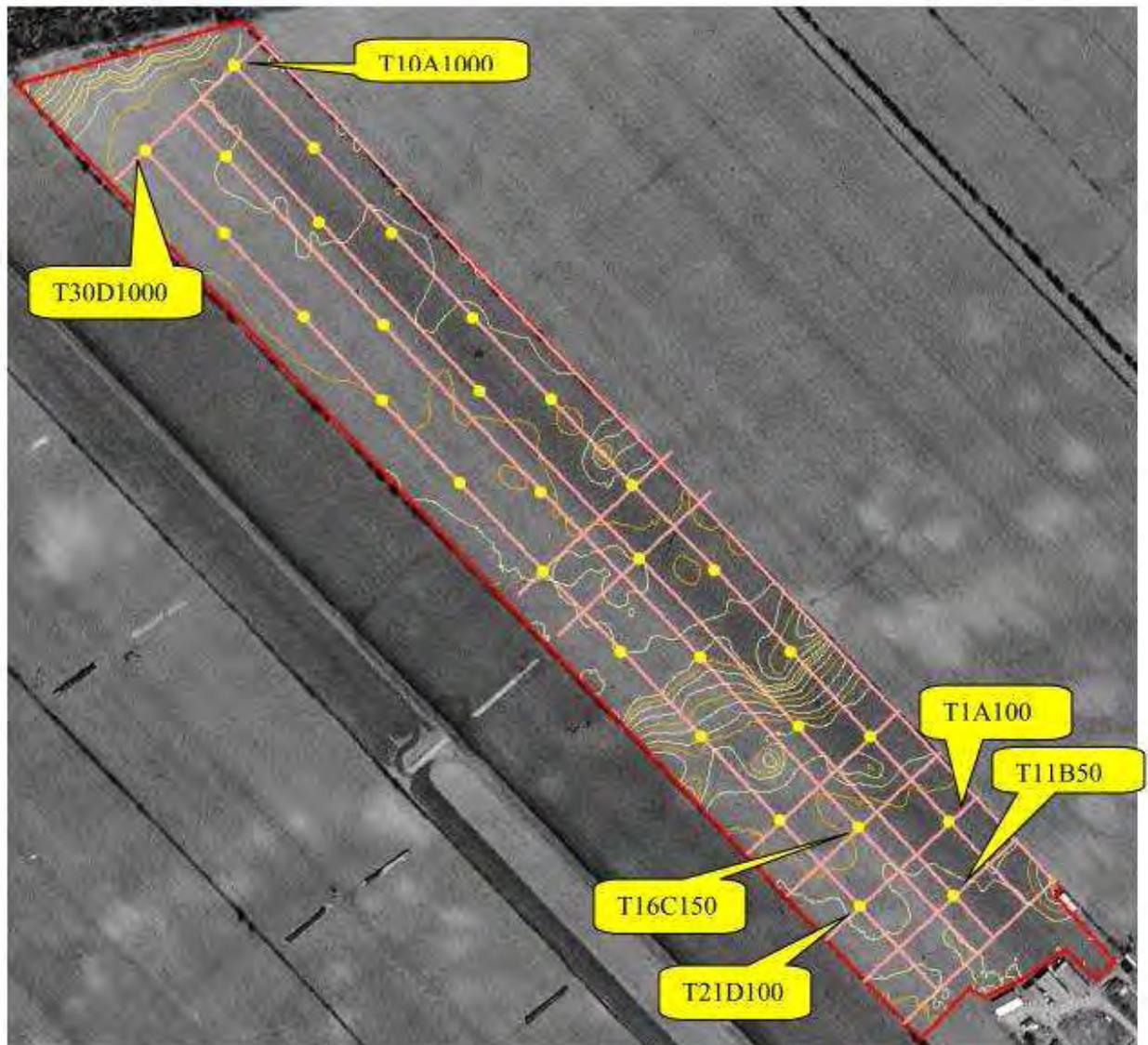


Figure 1. Carte satellite du champ à l'étude où les sites de mesures de la tension de l'eau dans le sol sont indiqués par un point jaune.

2.3 Collecte des données

La granulométrie, le pH, la matière organique, la teneur en éléments minéraux ainsi que les nitrates du sols furent déterminés dans chacune des 30 zones de mesures à partir d'échantillons composites des strates 0-30, 30-60 et 60-90 cm prélevés au printemps. Quatre échantillonnages subséquents (application des fertilisants, période de croissance, récolte et post-récolte au mois d'octobre) ont permis d'effectuer le suivi du mouvement des nitrates à travers le profil de sol en mesurant la teneur en nitrates dans chacune des strates. Les échantillonnages ont été effectués dans un rayon de 2 m autour du tensiomètre au moyen de sonde à tube creux de 2 cm de diamètre, à l'exception de celui en post-récolte qui fut effectué à l'aide d'un échantillonneur de sol hydraulique de marque Giddings. Cinq carottes de sol ont été prélevées sur le rang, à 20 cm des plants, suivant la méthode d'échantillonnage suggérée par le Guide du CRAAQ (2003).

La nutrition des plant a été évaluée par la mesure de du N total (N_{tot}) dosé dans la 4^{ème} feuille mature des plants au stade 50 à 75% floraison. Des plants entiers ont ensuite été prélevés juste avant le défanage afin de déterminer leur matière sèche et leur contenu en N_{tot} . Les prélèvement en N ont alors pu être calculés. Afin de déterminer les rendements totaux et vendables, des sections de 3,5 m de long sur deux rangs de large ont été récoltées manuellement dans chacune des 30 zones de mesure, dans un rayon de ± 2 m autour du tensiomètre juste avant la récolte par le producteur. La qualité des tubercules a été évaluée par la mesure de leur poids spécifique et de leur contenu en nitrates. Les tubercules ont été classés selon leur calibre et ont été examinés afin d'établir l'incidence de gale commune et de rhizoctonie. Enfin, la teneur en N_{tot} des tubercules a été mesurée, permettant le calcul des exportations contribuant à l'obtention du bilan azote sol-plante.

La disponibilité en eau du sol a été mesurée en continu dans chacune des 30 zones de mesure à l'aide de tensiomètres à communication sans fil de type Hortimètre T-80 d'HORTAU installés dans la zone racinaire des plants. Les données furent compilées quotidiennement dans un répertoire informatique relevé sur une base hebdomadaire. La pluviométrie (Pluviomètre HOBO, modèle RG3-M), la température et l'humidité relative de l'air ambiant (HOBO Pro v2, modèle U23-001) ont également été mesurées sans interruption pour la durée du projet.

En cours de saison, un prélèvement de cylindre de sol de 15 cm de hauteur et de 15 cm de diamètre a été effectué pour chacune des 30 zones de mesure afin d'établir les courbes de désorption en eau et de conductivité hydraulique non-saturée par un laboratoire spécialisé dans l'analyse des propriétés physiques du sol à l'Université Laval. Dans le premier cas, les courbes ont servi à mettre en relation les valeurs de tension mesurées dans le sol par les tensiomètres et le contenu en eau du sol pour une tension donnée. Dans le second, elles ont permis de déterminer à quel moment la remontée capillaire de l'eau dans le sol ne permet plus de combler l'eau perdue par évaporation, ce qui a conduit à la valeur de tension pour laquelle l'irrigation devrait être déclenchée dans le sol et à la détermination du stress hydrique de 5%.

Enfin, la répartition spatiale des 30 tensiomètres a été établie par positionnement géo-satellite en fin de saison, avant que les tensiomètres ne soient retirés du champ. Ceci a permis l'élaboration du relevé topographique du champ et a conduit au repérage des zones de mesure pour un repositionnement exact des tensiomètres lors des années suivantes.

2.4 Analyse des données

Les patrons ayant trait à la tension de l'eau dans le sol et les rendements en pommes de terre ont été analysés par variographie et krigeage avec le logiciel d'analyse en géostatistique GS⁺. Les relations entre les variables à l'étude ont aussi été déterminées par analyse de corrélation avec la procédure CORR de SAS. La corrélation de Pearson a été utilisée, sauf dans les cas où la répartition des données ne rencontrait pas la normalité. Dans ce dernier cas, la corrélation de Spearman a été utilisée. Ces deux types de corrélation sont toutes deux englobées dans la procédure CORR de SAS.

2.5 Résultats obtenus pour la saison 2007 selon les objectifs spécifiques

2.5.1 Déterminer si les patrons de variabilité observés correspondent à une distribution aléatoire du potentiel hydrique ou s'ils reflètent une structure spatiale constante, correspondant à des variations de texture du sol ou d'élévation du relief.

2.5.1.1 Distribution aléatoire ou structure spatiale

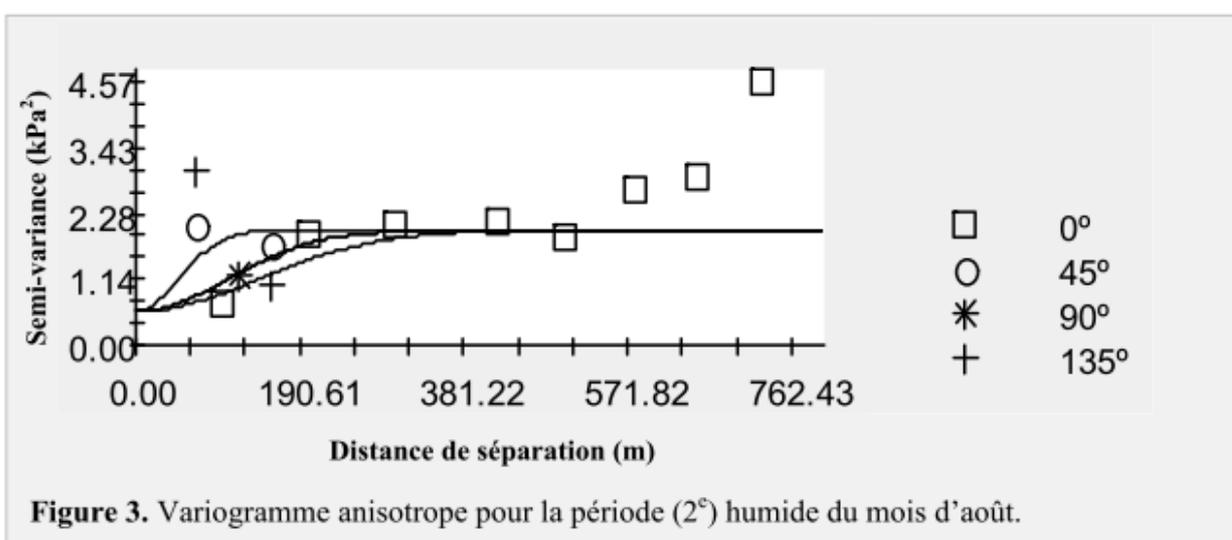
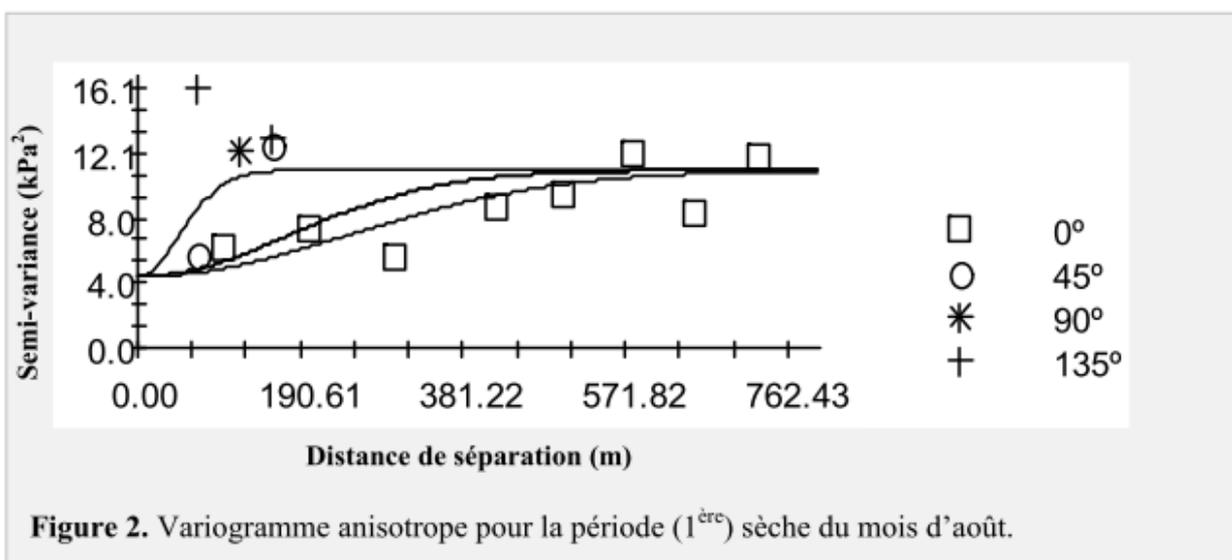
L'analyse des patrons d'humidité observés au champ s'appuie sur des mesures effectuées lors de trois périodes qui se sont distinguées en cours de saison au niveau hydrique. Les deux premières périodes se retrouvent au mois d'août. Cela correspond à une période importante de la production durant laquelle la croissance du tubercule est exponentielle. La première période est classée sèche (entre 7 et 13 kPa de tension) et la seconde, subséquente à une pluie, est classée humide (entre 2 et 8 kPa de tension). La troisième période analysée, située en septembre, correspondait à une situation où la tension de l'eau dans le sol était près de la capacité au champ (6 kPa de tension). Cette diversité de périodes englobe trois situations hydriques importantes que l'on peut observer régulièrement durant une saison de production et qui devraient influencer la gestion de l'irrigation.

Des valeurs moyennes de tension de l'eau dans le sol (potentiel hydrique du sol) ont été calculées pour chacune de ces trois périodes et ces moyennes ont ensuite été analysées individuellement afin de vérifier si elles expriment une structure spatiale constante.

L'analyse de la structure spatiale a comme fondement que si la répartition des zones plus sèches et humides dans l'ensemble du champ n'est pas due au hasard, les mesures de tension de l'eau dans le sol qui ont été effectuées à proximité l'une de l'autre devraient se ressembler davantage que les mesures qui se retrouvent plus éloignées l'une de l'autre. La géostatistique permet de quantifier cette continuité afin de vérifier la présence ou l'absence de structure dans les patrons. Le nombre de points de prise de mesure est donc un facteur important dans la précision et la validité de l'analyse et c'est pourquoi 30 points de lecture au champ ont été utilisés dans cette étude, en fonction de la distance qui les sépare, pour évaluer le comportement spatial de l'humidité dans le sol. La position géographique des 30 tensiomètres dans le champ à l'étude est indiquée par les points jaunes à la figure 1.

La résultante de l'analyse est reproduite graphiquement sous forme de variogramme. Le variogramme renseigne donc sur la présence ou non de structure dans les patrons d'humidité. L'absence de palier (ligne droite) indiquera qu'il n'y a pas de structure, c'est-à-dire que les patrons d'humidité observés au champ sont aléatoires. Le variogramme présenté à la figure 2 a été généré avec les valeurs moyennes de tension de l'eau dans le sol de la première période, dite sèche, comprenant les plus grands écarts de tension mesurés par les tensiomètres entre les différentes zones du champ. L'axe horizontal du

graphique représente la distance en mètres qui sépare deux mesures de tension dans le champ. La présence d'un palier indique clairement que le patron d'humidité prévalant durant cette période est structuré. L'atteinte du plateau vers les 400 m renseigne sur la portée de la valeur mesurée : dans les conditions d'humidité qui prévalaient à cette période, les zones qui se ressemblaient se retrouvaient à l'intérieur d'un rayon de 400 m. L'étude du variogramme de la seconde période montre que ce rayon diminue à 200 m lorsque le sol présente des conditions plus humides suite à une pluie (figure 3). Enfin, à capacité au champ, les zones semblables se retrouvaient à l'intérieur d'un rayon de 150 m (figure 4).



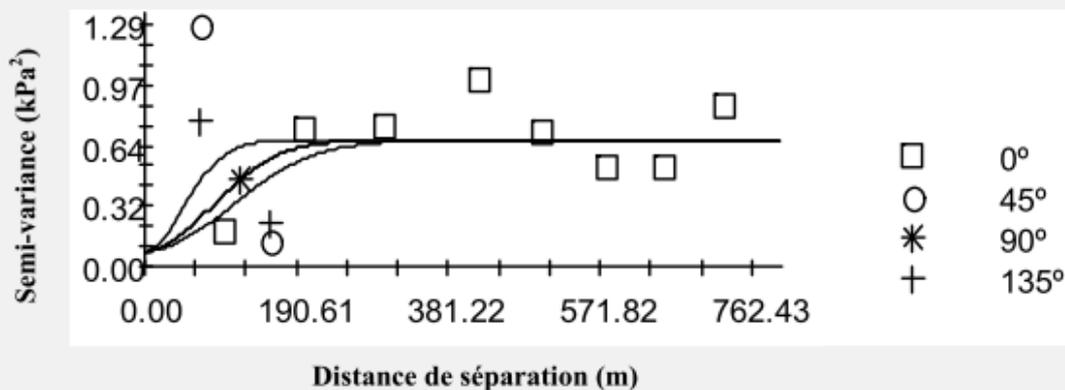


Figure 4. Variogramme anisotrope pour la période (3^e) près de la capacité au champ du mois de septembre.

En plus de renseigner sur la présence d'une structure dans les patrons observés, la connaissance de la valeur du rayon permet d'évaluer, théoriquement, le nombre minimal de tensiomètres requis pour détecter un stress hydrique au seuil de précision voulu pour une superficie donnée. Il s'agit d'une donnée stratégique pour le producteur puisque le suivi de la tensiométrie du sol n'a de valeur que si elle est fiable et représentative. En effet, bien que l'irrigation soit une solution préconisée pour contrer les impacts négatifs des déficits hydriques sur le rendement et la qualité des tubercules, celle-ci doit cependant permettre d'appliquer seulement la quantité d'eau dont la plante a besoin pour éviter les coûts inutiles, incluant ceux des fertilisants, principalement l'azote, et des pesticides pouvant être lessivés et risquant ainsi de contaminer la nappe phréatique.

2.5.1.2 Corrélation entre les patrons d'humidité observés et la matière organique, la texture dans l'horizon 0-30 cm et la topographie du terrain.

Certains facteurs comme le taux de matière organique, la texture du sol et la topographie du terrain pourraient expliquer en partie les patrons observés au champ. Pour ce faire, le coefficient de corrélation de Pearson a été calculé entre ces facteurs et la tension en eau dans le sol pour les périodes 1 et 2, dites sèche et humide, du mois d'août.

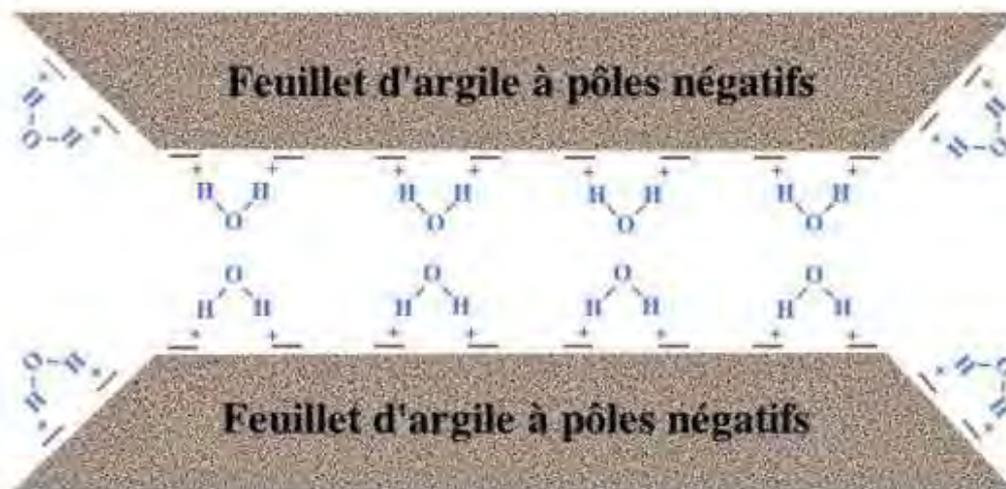
En ce qui concerne la période humide, aucune relation significative n'est ressortie. Cette absence de relation pourrait s'expliquer du fait que la tension de l'eau dans plusieurs zones à ce moment est inférieure à la capacité au champ (6 kPa), donc en situation de saturation qui une fois atteinte ne peut pas être supérieure. Par contre, en période dite sèche, des corrélations apparaissent. Lorsque le sol est drainé, les différents patrons sont davantage visibles car divers facteurs influencent la capacité de rétention en eau des sols et donc la vitesse de drainage qui sera changeante selon les endroits.

La composition des sols est un facteur qui peut influencer cette capacité de rétention. En effet, au fur et à mesure que la tension du sol augmente, les variations dans la proportion de sable et d'argile dans l'horizon 0-30 cm se retrouvent corrélées avec les tensions mesurées et contribuent à expliquer les patrons observés. Ceci concorde avec le fait reconnu que le volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir, sa capacité de rétention, dépend essentiellement de sa granulométrie. Ainsi, dans les zones où la proportion de sable ($P = 0,038$) est plus élevée et celle en argile ($P = 0,063$) plus basse, la tension de l'eau dans le sol est plus élevée (tableau 1). Ces résultats concordent avec le fait que l'argile est reconnue pour posséder une capacité de rétention en eau plus élevée que celle du sable, très drainant. Conséquemment, une plus forte présence d'argile permet au sol une plus grande retenue d'eau. Cette propriété de l'argile à retenir fortement l'eau, possédée aussi par l'humus du sol, tient au fait de la finesse des particules, de leur polarité et de leurs grandes surfaces d'échange (figure 5). En effet, bien que sur le terrain la matière organique stabilise les agrégats du sol et maintienne ainsi une bonne macroporosité (perméabilité accrue), au final, elle augmente considérablement la rétention hydrique du sol du fait de ses propriétés de mouillabilité qui modifient la tension superficielle de la solution de sol. À ce titre, une relation négative était aussi attendue entre le contenu en matière organique du sol, reconnue pour son pouvoir absorbant, et la tension hydrique. Il se peut que se manque de lien soit dû au fait que le contenu en matière organique dans le champ était plutôt variable. Il y a aussi absence de lien entre la topographie et la tension. Les dépressions et élévations du sol réparties sur le terrain ne sont donc pas responsables du patron des tensions à l'inverse de ce qui est généralement entendu.

Tableau 1. Coefficient de corrélation (r) entre la tension en eau du sol et le taux de matière organique, la texture du sol et la topographie du champ à l'étude.

Variables testées	Périodes		
		No. 1- Humide	No. 2- Sèche
Matière organique (0-30 cm)	r	-0,01	-0,18
	P	0,955	0,348
% Sable (0-30 cm)	r	-0,01	0,38
	P	0,981	0,038
% Limon (0-30 cm)	r	-0,05	-0,22
	P	0,787	0,253
% Argile (0-30 cm)	r	0,06	-0,34
	P	0,773	0,063
Topographie	r	0,25	0,20
	P	0,186	0,297

Tension superficielle à la surface de l'argile



Source: www.afidol.org

Figure 5. Rétention en eau du sol par l'argile.

2.5.2 Cartographier les zones d'irrigation dites sèches, moyennes et intermédiaires dans un champ donné.

Les patrons d'humidité analysés pour les trois périodes considérées ont été cartographiés et sont présentés aux figures 6, 7 et 8. Pour les deux premières périodes, les zones plus sèches sont surtout localisées dans la deuxième moitié du champ (à partir de 700^e m) et dans la première partie du champ, sur la droite entre le 1^{er} et le 95^e m de largeur. Les zones humides sont plutôt présentes entre le 95 et 155^e m en largeur (à partir du 400^e m) pour atteindre ensuite la première moitié en largeur, et ce, jusqu'au 700^e m. Pour la dernière période, soit celle illustrée à la figure 8, une zone plus sèche, supérieure à la valeur correspondant à la capacité au champ (6 kPa), s'observe comme pour les deux premières périodes, dans la 2^e moitié du champ. Un noyau plus humide est présent à partir de 350 m jusqu'à 550 m. Pour le reste, les valeurs de tension de l'eau dans le sol se rapprochent de celles pour la capacité au champ.

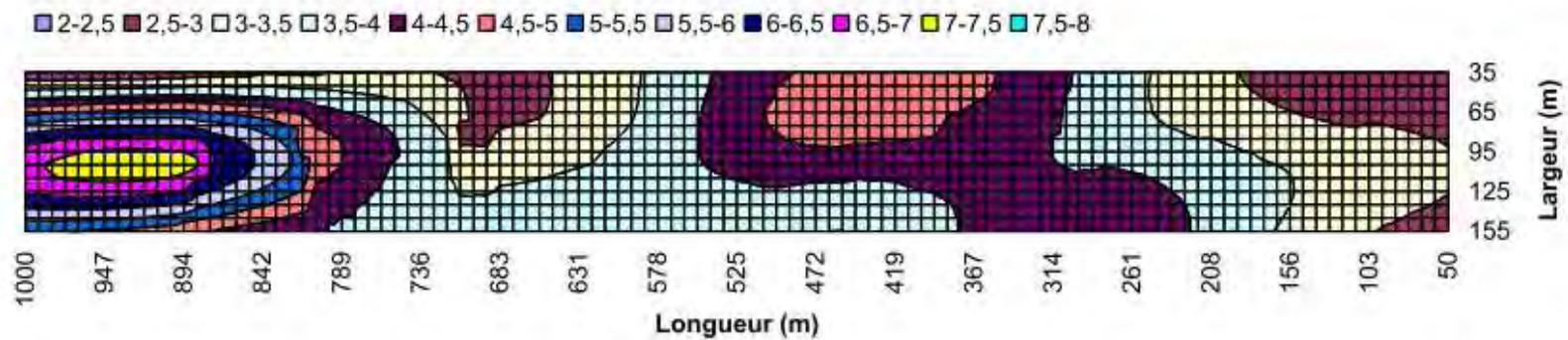


Figure 6. Cartographie des zones d'humidité pour la période dite humide (2 à 8 kPa).

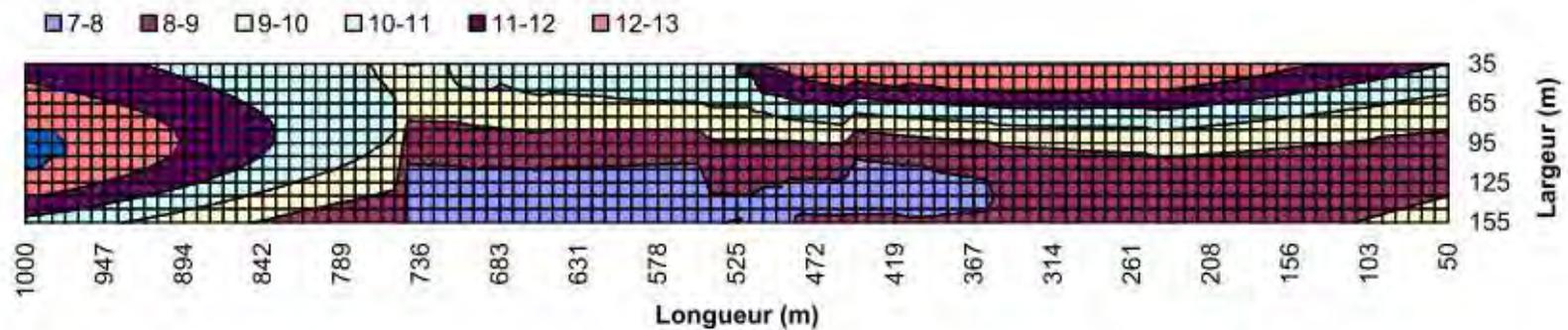


Figure 7. Cartographie des zones d'humidité pour la période dite sèche (7 à 13 kPa).

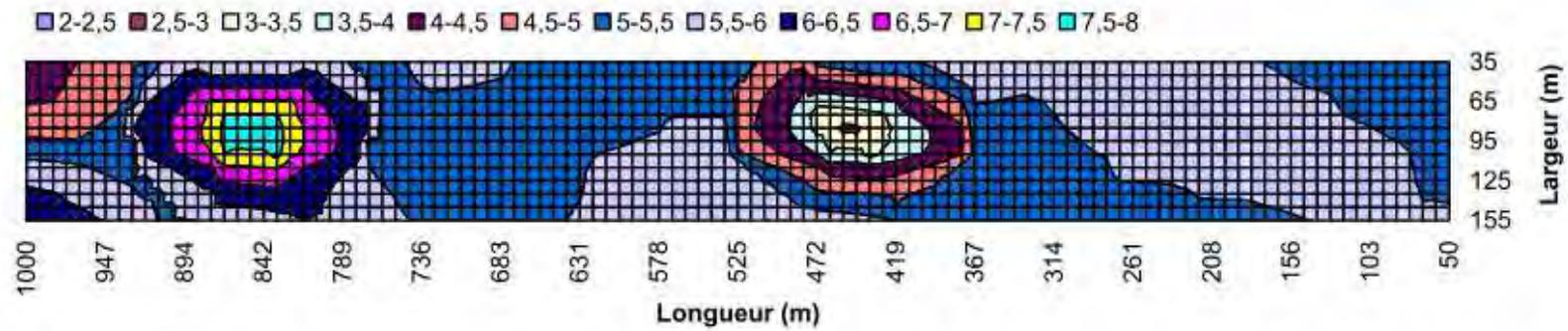


Figure 8. Cartographie des zones d'humidité pour la période près de la capacité au champ en septembre (2 à 8 kPa).

2.5.3 Relier les patrons d'humidité observés aux rendements en pommes de terre.

Les coefficients de corrélation de Pearson (r) entre les rendements et la tension de l'eau du sol sont présentés au tableau 2. Il existe une relation significative ($P = 0,042$) entre la tension enregistrée aux 30 sites de mesures durant la 2^e période, humide, et le rendement vendable mesuré aux mêmes points ($r = 0,373$). Autrement dit, dans les conditions de l'étude, la tension de l'eau dans le sol est un facteur qui explique partiellement la variation de rendement observée à l'échelle du champ.

Tableau 2. Coefficient de corrélation (r) entre les rendements et la tension de l'eau dans le sol.

Variables testées		Périodes	
		No. 1 - Sèche	No 2. - Humide
Rendements total	r	-0,009	0,348
	P	0,961	0,059
Rendement vendable	r	0,011	0,373
	P	0,953	0,042

La relation entre le rendement et la tension de l'eau dans le sol est encore plus forte pour certaines zones du champ. En effet, pour les sites T1 à T10 (figure 1), le coefficient de corrélation est plus élevé (60% ou $r^2 = 0,357$) ($P = 0,06$). Cette relation est illustrée à la figure 9. Elle renseigne à l'effet que les rendements mesurés dans les zones plus humides (qui tendent vers 0 kPa) sont moindres que ceux obtenus en zones plus sèches (qui tendent vers 6 kPa). Elle permet aussi d'estimer la perte de rendement qui résulte d'une diminution de la tension de l'eau dans le sol (hausse de l'humidité). En effet, pour la période de mesure considérée, à l'intérieur des zones de tension de l'eau dans le sol correspondant à 5 kPa un rendement vendable d'environ 34 T ha⁻¹ a été mesuré, tandis que pour les zones à 2 kPa, le rendement baissait à 24 T ha⁻¹).

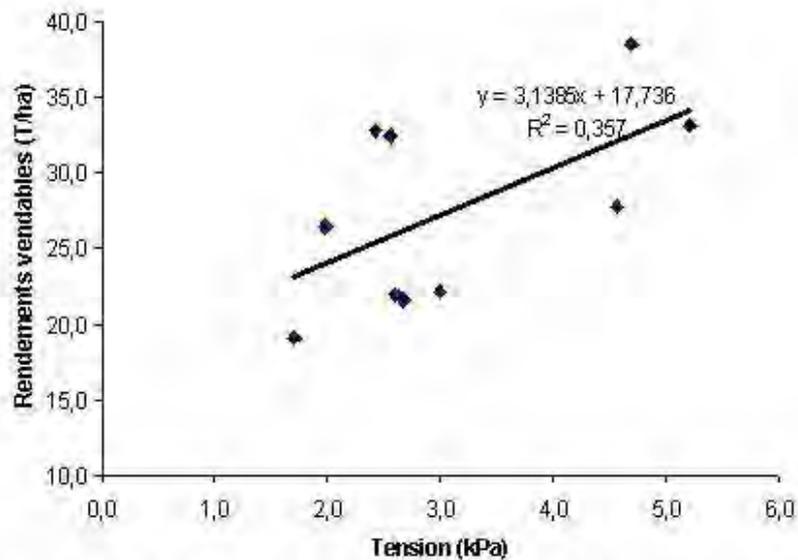


Figure 9. Relation entre la tension de l'eau dans le sol et le rendement vendable mesuré pour les sites de mesures T1 à T10.

La cartographie du rendement vendable et des patrons d'humidité observés pour la 2^e période, dite humide, est présentée aux figures 10 et 11. La zone encadrée en rouge à la figure 10 correspond à une zone de rendement moindre, soit de 22 à 28 T ha⁻¹, soit une perte pouvant atteindre 8 tonnes de rendement par rapport au rendement maximal mesuré. Cette même zone, à la figure 8, correspond à une zone humide (2,5 à 3,5 kPa). La même correspondance peut être observée entre les zones de rendements plus élevés et les zones de sol plus sèches, encadrées en vert.

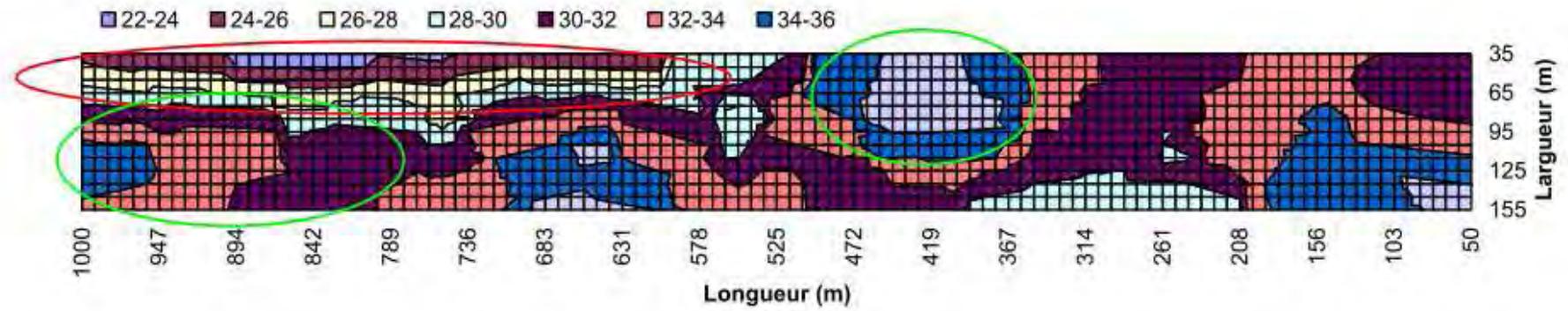


Figure 10. Cartographie des diverses zones de rendement vendable (T ha⁻¹).

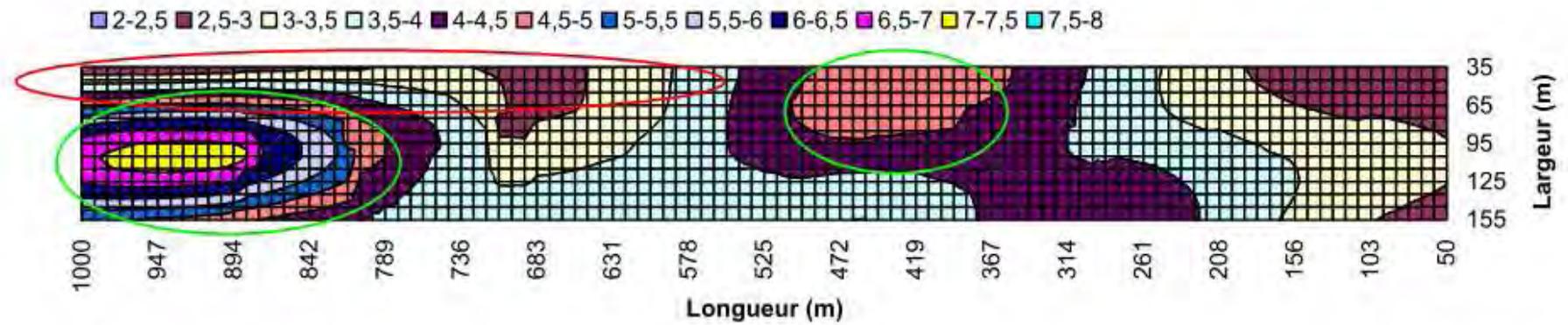


Figure 11. Cartographie des zones de tension de l'eau dans le sol pour la période dite humide (kPa).

2.5.4 Évaluer le nombre minimal de tensiomètres requis pour détecter un stress hydrique avec une précision de 5%.

Pour répondre à cet objectif, il faut utiliser la relation entre la tension de l'eau dans le sol pour la 2^e période, dite humide, et les rendements vendables mesurés en ces points, rapportée dans la section précédente.

Sachant qu'une chute de tension d'une unité occasionne une diminution de rendement d'environ 3,3 T ha⁻¹, pour déceler une baisse de rendement de 20 % du rendement maximal mesuré dans la saison (34 T ha⁻¹), soit un déficit de 7 tonnes, il faut détecter une chute de tension de 2 kPa. À partir de cette information, il est possible d'estimer le nombre de tensiomètres requis pour mesurer cette différence de tension, selon un niveau de confiance donnée, avec la loi statistique de « t » (équation 1).

Équation 1. Loi de « t »

$$T = \frac{\text{Différence recherchée entre 2 zones}}{(\text{Écart-type} * (\text{Nombre de tensiomètres})^{1/2})}$$

Cette équation permet de calculer les valeurs de T qui seront utilisées pour déterminer le nombre de tensiomètres pour atteindre le niveau de précision voulue (tableau 3). La valeur de T calculée doit être supérieure à la valeur de T tabulée dans la Table de la valeur de T de Student – Bilatérale pour qu'elle soit déclarée significative au niveau de confiance voulue. Conséquemment, avec 4 tensiomètres, il est théoriquement possible de détecter un stress hydrique de 2 kPa ou une perte de rendements de 7 tonnes avec un niveau de confiance de 10 % (9 fois sur 10). Pour augmenter ce niveau à 5 %, i.e. 9,5 fois sur 10, il faudrait 5 tensiomètres. La superficie gérable par ce nombre de tensiomètres serait, dans le cas de cette période humide, de 4 ha, soit une portée de 250 m mesurée par le variogramme (figure 3) par la largeur du champ, soit 155 m.

Tableau 3. Détermination du nombre de tensiomètres nécessaires pour obtenir le niveau de confiance souhaitée.

Nombre de tensiomètres	Valeur de T	Niveau de confiance		
		5 %	10 %	
2	2,000	12,70	6,31	Non significatif
3	2,449	4,30	2,92	Non significatif
4	2,828	3,18	2,35	Significatif (10%)
5	3,162	2,77	2,13	Significatif (5 et 10%)

2.5.5 Établir un lien de cause à effet entre la variabilité de la teneur en eau d'un champ et la descente des nitrates au travers du profil de sol par lessivage.

Au cours de la saison de croissance, les teneurs en nitrates mesurées au travers du profil de sol dans les trois strates étudiées n'ont en aucun temps été liées à la teneur en eau du sol (tableau 4). La présentation graphique du contenu en nitrates au travers des diverses strates du profil du sol en relation avec la cartographie des teneurs en eau illustre bien cette absence de lien (figure 12). Les graphiques ont été réalisés par le regroupement des données de nitrates selon les classes de teneurs en eau utilisées pour dresser la carte. Quatre courbes ont ainsi été obtenues, une par zones sèches et humides, de la première (zones situées entre 50-500 m) et deuxième moitié (zones situées entre 500-1000 m) du champ. On peut alors observer à la figure 12 que les zones contenant davantage de nitrates ne correspondent pas aux zones décrites précédemment comme sèches ou humides. En fait, bien qu'aucune tendance générale ne se dessine pour l'ensemble des cinq périodes, en juin et juillet, alors que la croissance des plants est très active, c'est plutôt l'emplacement dans le champ qui semble déterminant (figure 12). Durant la période du 13 juin, les teneurs en nitrates dans la strate 0-30 cm des zones situées dans la 2^e moitié du champ présentaient en effet des valeurs entre 44 et 59 mg kg⁻¹ b.s., tandis que celles des zones situées dans les 500 premiers mètres oscillaient entre 28 et 35 mg kg⁻¹ b.s. La strate utile de sol des zones situées dans la 2^e moitié du champ contenait ainsi en moyenne 1,6 fois plus de nitrates que celle des zones situées dans la 1^{ère} moitié du champ. De même, au cours de la période du 17 juillet, les teneurs en nitrates de la strate utile de sol situées dans la 2^e moitié du champ atteignaient entre 68 et 78 mg kg⁻¹ b.s., tandis que celles des zones situées dans les 500 premiers mètres étaient en moyenne 1,8 fois inférieures, valant entre 37 et 43 mg kg⁻¹ b.s. Plus en profondeur, une telle tendance n'est cependant pas présente.

Tableau 4. Coefficient de corrélation (r) entre le contenu en nitrates au travers du profil de sol et la teneur en eau du sol au cours des cinq périodes étudiées.

Variables testées		Teneurs en eau				
		15 mai	13 juin	17 juillet	20 septembre	24 octobre
Nitrates (0-30 cm)	r	nd	-0.14	-0.28	0.13	0.03
	P	nd	0.5473	0.1521	0.5034	0.8599
Nitrates (30-60 cm)	r	nd	-0.04	-0.11	-0.11	0.11
	P	nd	0.8828	0.5895	0.5615	0.5541
Nitrates (60-90 cm)	r	nd	0.18	0.02	0.03	0.18
	P	nd	0.4418	0.9121	0.8739	0.3355

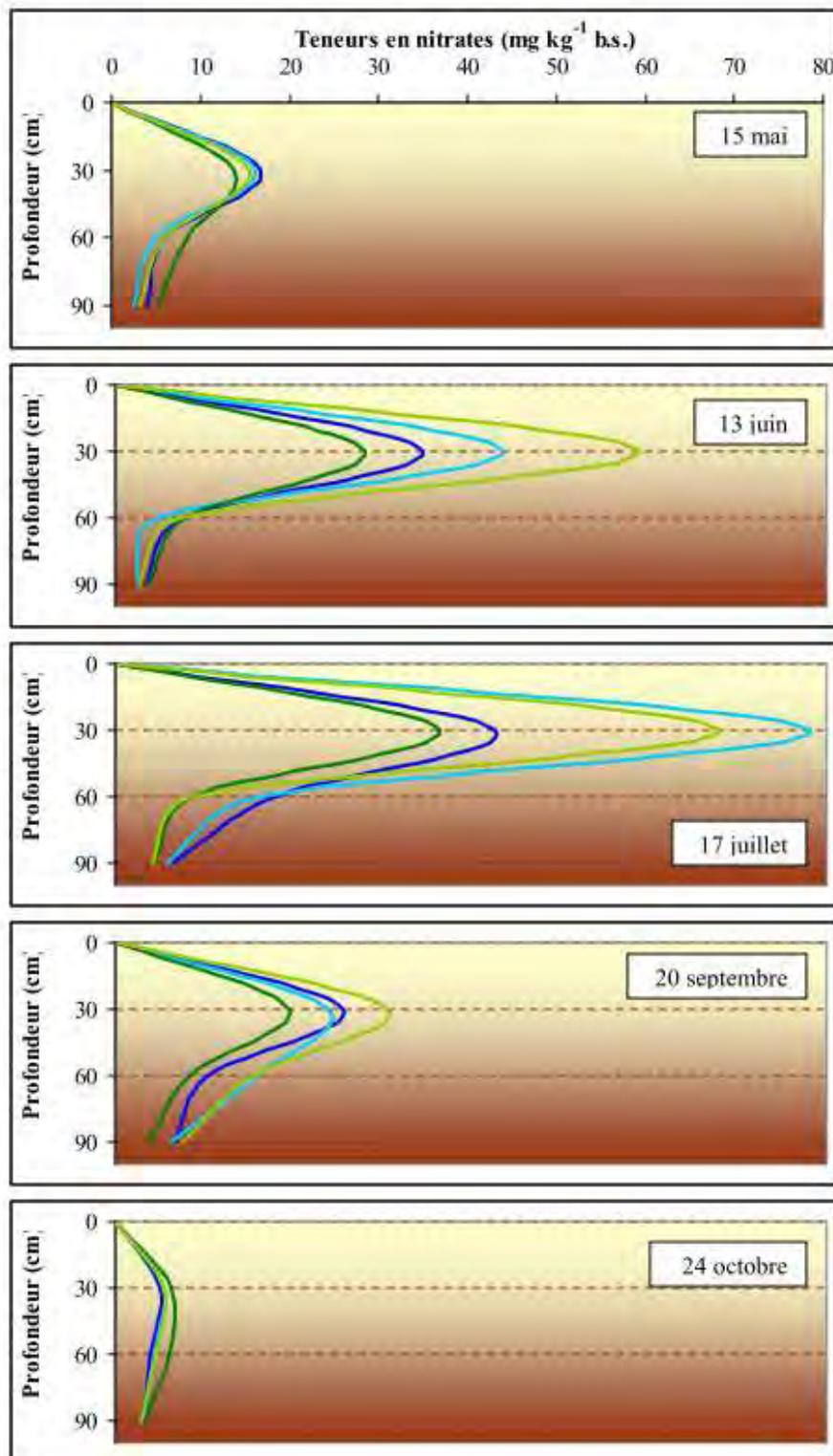


Figure 12. Teneurs en nitrates au travers du profil de sol en cours de saison.

Par ailleurs, l'observation des graphiques de la figure 12 permet aussi de bien visualiser la répartition et l'évolution des nitrates dans le profil de sol. On y discerne bien que la hausse des teneurs en nitrates s'est faite principalement dans la strate utile (0-30 cm) au cours de l'été, en juin et juillet, alors que les teneurs en nitrates présentaient des valeurs de 2,0-3,8 fois et 2,5-4,9 fois supérieures, respectivement, à celles mesurées en mai. Cette hausse dans la strate 0-30 cm a été suivie d'une augmentation conséquente, allant jusqu'à 3,2 fois, décalée dans le temps, dans la strate suivante (30-60 cm) au cours des mois de juillet et septembre, probablement due à la descente d'une partie des nitrates accumulées précédemment. Finalement, on peut y observer le déclin des valeurs jusqu'à devenir similaires dans tout le profil suivant les grandes pluies d'automne à la fin d'octobre.

Afin de tenter de comprendre l'absence de lien entre les patrons d'humidité et les teneurs en nitrates, une analyse de corrélation a été effectuée entre certains paramètres de sol et les teneurs en nitrates (tableau 5). De forts liens se sont alors révélés, principalement entre les teneurs en nitrates et les contenus en sables et en argiles du sol. En présence d'une plus forte proportion d'argile, les teneurs en nitrates étaient plus élevées. Réciproquement, les valeurs sont plus basses lorsque le sol contenait davantage de sables. Ceci suggère que les nitrates ont été plus mobiles et se sont perdus par lessivage dans les endroits plus sableux du champ. Ceci concorde avec la littérature au sujet de la descente des nitrates. Les nitrates, non fixés par le sol, se déplacent avec le mouvement de l'eau. En présence de plus d'argile, reconnue pour posséder une capacité de rétention en eau plus élevée que celle du sable, l'eau demeure plus longtemps et les nitrates ont un temps de résidence plus long et peuvent donc, dans une certaine mesure, s'accumuler. Par contre, dans les sables, beaucoup plus drainant, les nitrates sont entraînés avec le mouvement de l'eau et sont perdus au travers du profil du sol. Les deux années du projet subséquent, qui se déroulera de 2008 à 2010, seront nécessaires pour tenter de comprendre pourquoi la teneur en eau du sol et les contenus en nitrates, tout deux influencés par la texture du sol, ne présentent pas de concordance dans leur patrons de distribution.

Tableau 5. Corrélation entre le contenu en nitrates au travers du profil de sol et certains paramètres de sol en cours de saison.

Variables testées		Teneurs en nitrates														
		15 mai			13 juin			17 juillet			20 septembre			24 octobre		
		0-30 [†]	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
MO [‡]	r	0.45	0.31	0.31	0.23	-0.17	-0.38	0.13	-0.03	-0.21	0.12	0.07	0.12	0.11	-0.09	-0.28
(0-30 cm)	P	0.0125	0.0902	0.0987	0.2204	0.3665	0.0364	0.4788	0.8699	0.2721	0.5232	0.7228	0.5364	0.5768	0.6283	0.1297
% Sable	r	0.03	0.19	0.10	-0.12	0.06	0.32	-0.46	-0.30	-0.10	-0.28	-0.41	-0.21	-0.19	-0.07	-0.04
(0-30 cm)	P	0.8567	0.3144	0.5891	0.4943	0.7491	0.0850	0.0098	0.1103	0.5966	0.1331	0.0231	0.2572	0.3255	0.7251	0.8376
% Limon	r	-0.15	-0.24	-0.22	-0.18	-0.36	-0.46	0.11	-0.09	-0.26	-0.18	-0.04	-0.24	-0.21	-0.14	0.03
(0-30 cm)	P	0.4307	0.2045	0.2373	0.3304	0.0479	0.0115	0.5623	0.6227	0.1712	0.3459	0.8520	0.2014	0.2652	0.4597	0.8819
% Argile	r	0.19	-0.06	0.06	0.36	0.25	-0.03	0.48	0.55	0.37	0.59	0.68	0.55	0.46	0.23	0.03
(0-30 cm)	P	0.3209	0.7412	0.7412	0.0515	0.1746	0.8705	0.0073	0.0016	0.0463	0.0006	<.0001	0.0016	0.0099	0.2261	0.8774
MO	r		0.75	0.46		-0.06	-0.15		-0.18	-0.23		-0.22	-0.11		0.08	-0.21
(30-60 cm)	P		<.0001	0.0106		0.7417	0.4247		0.3501	0.2172		0.2432	0.5497		0.6694	0.2681
% Sable	r		-0.46	-0.25		-0.16	-0.001		-0.18	-0.18		0.02	-0.09		-0.48	0.04
(30-60 cm)	P		0.0108	0.1884		0.3932	0.9945		0.3387	0.3393		0.9112	0.6465		0.0076	0.8446
% Limon	r		0.43	0.29		-0.01	0.07		0.11	0.02		0.02	0.08		0.27	0.15
(30-60 cm)	P		0.0190	0.1192		0.9485	0.6982		0.5720	0.9072		0.9167	0.6878		0.1469	0.4296
% Argile	r		0.19	0.04		0.25	-0.07		0.30	0.34		0.08	0.16		0.43	-0.21
(30-60 cm)	P		0.3035	0.8456		0.1751	0.6964		0.1017	0.0652		0.6808	0.4091		0.0168	0.2641
MO	r			0.66			0.22						-0.01			0.37
(60-90 cm)	P			<.0001			0.2393						0.9655			0.0453
% Sable	r			-0.44			-0.22						-0.48			-0.30
(60-90 cm)	P			0.0152			0.2523						0.0072			0.1046
% Limon	r			0.19			0.12						-0.16			-0.03
(60-90 cm)	P			0.3267			0.5296						0.4418			0.8871
% Argile	r			0.22			0.14						0.19			0.32
(60-90 cm)	P			0.2498			0.4761						0.2906			0.0800

[†] Strates de sol en centimètres.

[‡] Matière organique.

2.5.6 Étudier l'impact possible des zones de variabilité sur la qualité des tubercules incluant le poids spécifique, le contenu en nitrates et les taux de maladies fongiques, telles la rhizoctonie et la gale.

Différents paramètres permettant d'évaluer la qualité des tubercules ont été mesurés et ces derniers ont été mis en relation avec les patrons d'humidité du sol observés pour deux périodes différentes, soit une première période, dite sèche, et une seconde, dite humide. En ce qui a trait au poids spécifique et au contenu en nitrates des tubercules, les coefficients de corrélation (r) calculés démontrent l'absence de relation significative entre ces variables (tableau 6).

Une relation significative ($P = 0,021$) entre la tension de l'eau du sol en période humide et l'indice de gale a cependant été identifiée et cette dernière indique que l'indice de gale est plus élevé pour les tubercules qui ont été récoltés dans les zones plus humides. L'évaluation de l'indice de gale ne discriminait pas entre la gale commune ou poudreuse, difficile à évaluer à l'œil nu. Cette relation semble indiquer la présence de la gale poudreuse, car cette dernière est favorisée par l'humidité du sol.

À propos de la rhizoctonie, il est reconnu que l'incidence de cette dernière est favorisée par des conditions de sol humide. Toutefois, la relation significative ($P = 0,0001$) entre l'indice de rhizoctonie et la tension de l'eau dans le sol en période sèche indique le contraire. En effet, selon cette relation, des conditions de sol sec seraient favorables à la sévérité de cette maladie.

Tableau 6. Coefficient de corrélation (r) entre la tension en eau du sol et la qualité des tubercules.

Variables testées		Périodes	
		No. 1 – Sèche	No.2 – Humide
Poids spécifique	r	-0,28	0,11
	P	0,129	0,574
Contenu en nitrates	r	-0,20	-0,15
	P	0,290	0,432
Indice de gale	r	-0,10	-0,42
	P	0,605	0,021
Indice de rhizoctonie	r	0,75	0,19
	P	0,0001	0,314

2.5.7 Vérifier l'impact économique d'une telle pratique en estimant les pertes de revenus engendrées par les baisses de rendements occasionnées par les zones de variabilité en humidité du sol.

Une relation entre les zones plus humides et un rendement vendable plus faible a été démontrée au tableau 2 ($r = 0,37$; $P = 0,042$). De plus, un indice de gale plus élevé a été mesuré sur les tubercules récoltés dans ces zones ($r = -0,42$, $P = 0,021$). Des rendements vendables plus faibles et la diminution de la qualité des tubercules attribuables aux zones plus humides sont des pertes économiques dans la mesure où des rendements et une qualité supérieure auraient pu être obtenus si les conditions d'humidité de sol avaient été plus uniformes. De plus, comme démontré précédemment, cette corrélation était plus forte dans certaines zones (T1 à T10) du champ où elle atteignait $r = 0,60$ ($P = 0,06$). Dans cette zone, la chute d'une unité de tension (1 kPa) occasionnait donc des pertes de rendement d'environ $3,3 \text{ T ha}^{-1}$ (voir 2.5.4) avec des pertes économiques conséquentes. Il n'est cependant pas possible pour l'instant de compléter plus avant l'analyse économique et de déterminer un montant exact de pertes. L'impact économique qui découlerait de l'uniformisation de la teneur en eau du sol à l'échelle du champ est, entre autres, tributaire des gains en rendements vendables et possiblement en qualité des tubercules. Cet aspect sera vérifié dans un second projet qui débutera au printemps 2008.

2.5.8 Acquérir les connaissances préalables à la rationalisation adéquate de l'application de l'eau en fonction des zones sèches ou humides existantes dans un champ donné dans le but d'uniformiser la teneur en eau du champ et, incidemment, les rendements en pommes de terre.

Les analyses effectuées sur les 30 échantillons de sol prélevés durant la saison ont permis de déterminer certaines propriétés hydrauliques importantes du sol, telles les courbes de rétention et de conductivité hydraulique non saturée et saturée, ainsi que certains paramètres physiques, telles la masse volumique apparente et réelle et la porosité totale (tableau 7). Ces paramètres, indispensables au développement d'une méthode d'irrigation de précision et pour l'évaluation de l'uniformité du sol dans un champ, seront discutés et les informations qu'ils apportent interprétées.

Tableau 7. Propriétés physiques des échantillons de sol prélevés en 30 points dans le champ.

No du champ	ρ_a g/cm ³	ρ_s g/cm ³	θ_s cm ³ /cm ³	C_c cm	θ_c cm ³ /cm ³	θ_a cm ³ /cm ³	θ_{1mm} cm ³ /cm ³	RFU cm ³ /cm ³	K_s cm/s
T1A100	1,15	2,55	0,55	60	0,33	0,22	0,30	0,03	0,011227
T2A200	1,11	2,55	0,56	60	0,37	0,19	0,34	0,03	0,011104
T3A300	1,10	2,55	0,57	60	0,34	0,23	0,31	0,03	0,005229
T4A400	1,04	2,54	0,59	60	0,39	0,20	0,37	0,02	0,007964
T5A500	1,12	2,55	0,56	60	0,31	0,25	0,29	0,02	0,002410
T6A600	1,41	2,55	0,45	60	0,11	0,34	0,10	0,01	0,006254
T7A700	1,15	2,55	0,55	60	0,35	0,20	0,32	0,03	0,008970
T8A800	1,23	2,55	0,52	60	0,32	0,20	0,30	0,02	0,007093
T9A900	1,16	2,55	0,54	60	0,32	0,22	0,29	0,03	0,003039
T10A1000	1,18	2,57	0,54	60	0,33	0,21	0,32	0,01	0,003828
T11B250	1,01	2,58	0,61	60	0,33	0,28	0,29	0,04	0,006866
T12B250	1,12	2,58	0,57	60	0,34	0,23	0,31	0,03	0,008688
T13B450	1,10	2,58	0,57	60	0,38	0,19	0,35	0,03	0,002313
T14B650	1,10	2,58	0,57	60	0,34	0,23	0,33	0,01	*
T15B850	1,21	2,58	0,53	60	0,33	0,20	0,32	0,01	0,003458
T16C150	1,30	2,58	0,50	60	0,37	0,13	0,32	0,05	0,002523
T17C350	1,44	2,58	0,44	60	0,10	0,34	0,09	0,01	0,006468
T18C550	1,03	2,58	0,60	60	0,38	0,22	0,37	0,01	0,015112
T19C750	1,44	2,58	0,44	60	0,11	0,33	0,11	0,00	0,008388
T20C950	1,16	2,57	0,55	60	0,31	0,24	0,30	0,01	0,003643
T21D100	1,28	2,54	0,50	60	0,08	0,42	0,08	0,00	0,011823
T22D200	1,40	2,54	0,45	60	0,39	0,06	0,38	0,01	0,006946
T23D300	1,44	2,54	0,43	60	0,06	0,37	0,05	0,01	0,009256
T24D400	1,39	2,54	0,45	60	0,15	0,30	0,12	0,03	0,006975
T25D500	1,12	2,55	0,56	60	0,37	0,19	0,34	0,03	0,010155
T26D600	1,38	2,54	0,46	60	0,09	0,37	0,09	0,00	0,011032
T27D700	1,06	2,54	0,58	60	0,36	0,22	0,33	0,03	0,010053
T28D800	1,11	2,54	0,57	60	0,35	0,22	0,34	0,01	0,003886
T29D900	1,16	2,54	0,54	60	0,34	0,20	0,32	0,02	0,002086
T30D1000	1,07	2,54	0,58	60	0,39	0,19	0,35	0,04	0,007733
Moyenne	1,20	2,56	0,53		0,29	0,24	0,27	0,02	0,01

* Valeur non disponible

ρ_a : Masse volumique apparente

ρ_s : Masse volumique réelle

θ_s : Teneur en eau à saturation

C_c : Potentiel matriciel à la capacité au champ

θ_c : Teneur en eau à la capacité au champ

θ_a : Teneur en air

θ_{1mm} : Teneur en eau minimal du sol pour fournir un apport d'eau de 1 mm à la culture

RFU : Réserve en eau facilement utilisable

K_s : Conductivité hydraulique saturée

2.5.8.1 Courbes de conductivité hydraulique non saturée

La courbe de conductivité hydraulique non saturée décrit la facilité avec laquelle l'eau se déplace dans le sol en fonction de la succion de l'eau du sol, appelée **potentiel matriciel**. La conductivité hydraulique dépend de la tension, car un sol ayant une faible tension contient beaucoup d'eau et permet le déplacement rapide de cette eau, alors qu'un sol ayant une forte tension, donc très sec, permet seulement le déplacement de l'eau au ralenti. Cette propriété, unique à chaque sol, est importante pour estimer les pertes d'eau dans le sol par drainage et remontée capillaire. De plus, elle permet de mieux estimer la tension de quasi-équilibre lorsque le drainage cesse, tension caractéristique de la **capacité au champ**. Étant donné que les champs ne sont généralement pas saturés en eau, les informations fournies par cette courbe permettent de mieux comprendre le mouvement de l'eau dans le sol, car la vitesse à laquelle elle se déplace varie selon la tension qu'exerce le sol.

Les besoins en eau des plantes varient en fonction du stade de croissance et de la période de la journée. Ainsi, plus la plante grossit, plus ses besoins en eau augmentent. Des valeurs minimales et maximales de demande d'évapotranspiration rapportées au champ ont été déterminées sous les conditions du Québec (Gallichand et al. 1990). On considère que la plante a besoin, au début de sa croissance de 1 mm d'eau par jour pour répondre à ses besoins entre 9h00 et 15h00. À partir de cette valeur, il est possible de calculer la conductivité hydraulique non saturée minimale pour répondre à ce besoin.

$$\begin{aligned} 1 \text{ mm} &= 4,6\text{E-}06 \text{ cm/s} \\ 6 \text{ h} \times 3600 \text{ s/h} \times 10 \text{ mm/cm} \end{aligned}$$

Lorsque la plante grossit, ses besoins en eau augmentent à 6 mm. On calcule donc la conductivité hydraulique non saturée minimale pour fournir 6 mm d'eau à la plante pendant 6 heures.

$$\begin{aligned} 6 \text{ mm} &= 2,8\text{E-}05 \text{ cm/s} \\ 6 \text{ h} \times 3600 \text{ s/h} \times 10 \text{ mm/cm} \end{aligned}$$

Ce calcul est approximatif, car il postule un gradient hydraulique nul, ce qui est vrai au début de la transpiration seulement. Ces deux valeurs de conductivité hydraulique non saturée permettent de déterminer le potentiel matriciel minimal approximatif pour répondre aux besoins des plantes en fonction du stade de croissance puisque la teneur en eau à ces tensions correspond au point de flétrissement temporaire des plants. À ces tensions, les plants sont flétris, mais pas de façon permanente. Il faut donc maintenir le potentiel du sol au-dessus de cette valeur afin de maintenir la turgescence des plants et assurer ainsi un taux d'évapotranspiration maximal garant d'une activité photosynthétique optimale. Cette valeur détermine donc à quel potentiel matriciel il faut débiter l'irrigation.

Par ailleurs, la **capacité au champ** correspond au potentiel matriciel d'un sol ressuyé par gravité. Au-delà de cette valeur, la composante gravitaire est plus importante que la composante d'absorption, donc l'eau qui n'est pas retenue par le sol s'écoule en profondeur. La capacité au champ nous indique donc le potentiel matriciel maximal à atteindre suite à une irrigation. Si cette valeur est dépassée suite à un apport d'eau excessif, le surplus sera drainé. Tout efforts ou argent investis pour irriguer au-delà de cette valeur sont donc perdus. La capacité au champ se mesure au champ à l'aide d'un tensiomètre, 24 à 36 heures après la saturation complète du sol (soit après une pluie importante), lorsque les valeurs de tensions se stabilisent.

2.5.8.1.1 Interprétation des résultats obtenus pour le champ à l'étude

La meilleure façon d'interpréter les résultats obtenus est d'illustrer graphiquement les courbes de conductivité hydraulique non saturée. Parmi les courbes obtenues, celles de l'échantillon T5A500 ont été retenues, car elles se rapprochent des valeurs moyennes pour le champ (tableau 7) et sont donc les plus représentatives. D'abord, la capacité au champ (θ_c) est d'environ -60 cm, soit 6 kPa. La valeur correspondant au point de flétrissement temporaire est d'environ -75 cm, soit 7,5 kPa. Cette valeur renseigne sur la valeur de tension de l'eau dans le sol qui permet de fournir 1 mm d'eau à la plante car à cette tension, l'eau se déplace de 1 mm par 6 heures. Une tension plus élevée à celle correspondant à ce point indiquerait une situation où la plante subirait un grand stress hydrique. Théoriquement, la tension de l'eau dans le sol devrait donc être maintenue à une tension inférieure à 7,5 kPa. Dans la pratique, cette valeur, théorique, devrait toutefois être confirmée à petite échelle *in situ*.

Pour ce champ la tension permettant de fournir 6 mm d'eau en 6 heures à la plante est inférieure à celle pour la capacité au champ. Conséquemment, cela indique que la remontée capillaire de ce sol est insuffisante pour fournir à une demande en eau de la plante de 6 mm en 6 heures.

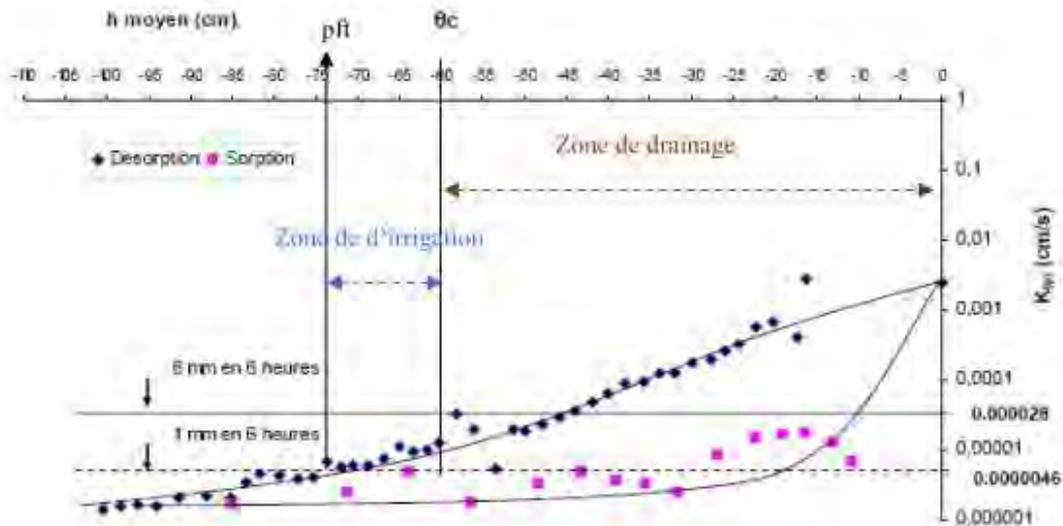


Figure 13. Courbes de conductivité hydraulique non saturée, échantillon T5A500.

2.5.8.2 Courbes de rétention.

La courbe de rétention décrit la relation entre la teneur en eau volumique du sol et le potentiel matriciel. Plus l'humidité du sol diminue, plus le potentiel matriciel augmente. La courbe de rétention est unique à chaque sol car elle varie en fonction de la quantité et du type d'argile, de la structure et du type de matière organique et de la distribution et de la taille des pores du sol. En effet, plus un pore est gros et moins il retient l'eau. Cette courbe permet donc de mieux comprendre la relation entre le sol et l'eau, et fournit plusieurs informations utiles dans l'élaboration d'une stratégie d'irrigation, telles que la capacité en air, la taille et la distribution des pores ou encore la réserve en eau utilisable. On peut donc, d'après cette courbe, estimer les quantités d'eau à appliquer et avoir une idée de l'aération dans les sols.

Grâce à la courbe de conductivité hydraulique non saturée décrite plus tôt, les potentiels matriciels minimaux pour que la plante prélève 1 ou 6 mm d'eau entre 9h00 et 15h00 ont été déterminés. Avec la courbe de rétention, on peut trouver la teneur en eau correspondant à ces valeurs, donc la teneur en eau minimale que le sol doit contenir pour subvenir aux besoins des cultures. Cette teneur en eau correspond au point de flétrissement temporaire, tel qu'expliqué précédemment. Une fois la teneur en eau au point de flétrissement temporaire et la capacité au champ connus, il est possible de déterminer la réserve en eau facilement utilisable du sol.

La réserve en eau facilement utilisable (RFU) correspond au contenu en eau que les plantes peuvent aisément extraire du sol. En effet, une certaine quantité d'eau est très liée aux particules de sol et ne peut être utilisée par les cultures. De plus, les plantes ne

peuvent utiliser l'eau de gravité. La teneur en eau facilement utilisable se situe donc entre le point de flétrissement temporaire et la capacité au champ. Pour la déterminer, il faut soustraire la teneur en eau au point de flétrissement temporaire de la teneur en eau à la capacité au champ.

La courbe de rétention permet également de connaître la **capacité en air du sol**, qui correspond au volume d'eau perdue par gravité et remplacée par de l'air. La capacité en air du sol, ou porosité d'air du sol, permet de comprendre le mouvement et l'entreposage de l'eau et des gaz dans le sol. En effet, l'aération des sols est essentielle à la survie des cultures.

Les courbes de rétention ont été tracées à partir des données recueillies lors de la mesure de la conductivité hydraulique non saturée. L'estimation de la teneur en eau minimale que le sol doit contenir pour subvenir aux besoins des cultures se fait ainsi : on considère que la plante a des besoins minimums de 1 mm d'eau pour satisfaire ses besoins pendant 6 heures, ce qui correspond à une conductivité hydraulique de $4,6E-06 \text{ cm s}^{-1}$. Comme pour l'exemple précédent, les courbes de rétention illustrées à la figure 14 sont celles de l'échantillon T5A500, car elles sont les plus représentatives pour le champ. À titre d'exemple, pour ce sol, la teneur en eau à saturation (θ_s) est de $0,56 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, tandis que celle à la capacité au champ (θ_c) est de $0,31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. La valeur du potentiel matriciel à la capacité au champ (-60 cm), illustrée à la figure 14, a permis de déterminer son équivalent en teneur en eau (ligne bleue). La différence entre la teneur en eau à saturation (θ_s) et celle à la capacité au champ (θ_c) correspond à la teneur en air (θ_a), qui est donc de $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Les courbes de conductivité hydraulique non saturée présentées à la figure 13, ont permis de déterminer que la teneur en eau au point de flétrissement était de $0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, soit la valeur de la teneur en eau qui correspond au potentiel matriciel (ligne rouge) et permettent d'estimer la RFU en soustrayant cette valeur à celle de la teneur en eau à la capacité au champ, soit $0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Enfin, en multipliant la profondeur d'enracinement à la RFU, on calcule la quantité théorique d'eau que ce sol peut contenir, pour la profondeur considérée, lorsque l'apport d'eau par l'irrigation se fait au point de flétrissement temporaire (θ_{ptf}). En considérant une profondeur des racines de 30 cm, ce sol serait en mesure de retenir 6 mm d'eau (équation 2). Toutefois, cette valeur est inférieure à celle généralement véhiculée dans la littérature pour les sols sableux, soit près de 21 mm par 30 cm de sol. Quoi qu'il en soit, lorsque la quantité d'eau appliquée est supérieure à la capacité de rétention en eau du sol, le surplus sera perdu par lessivage et inaccessible pour les racines.

Équation 2. Calcul de la capacité de rétention en eau d'un sol selon la profondeur des racines.

$$\begin{aligned} & \text{Profondeur des racines} * (\theta_c - \theta_{1 \text{ mm}}) \\ & 30 \text{ cm} * (0,31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} - 0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}) = 0,6 \text{ cm} \end{aligned}$$

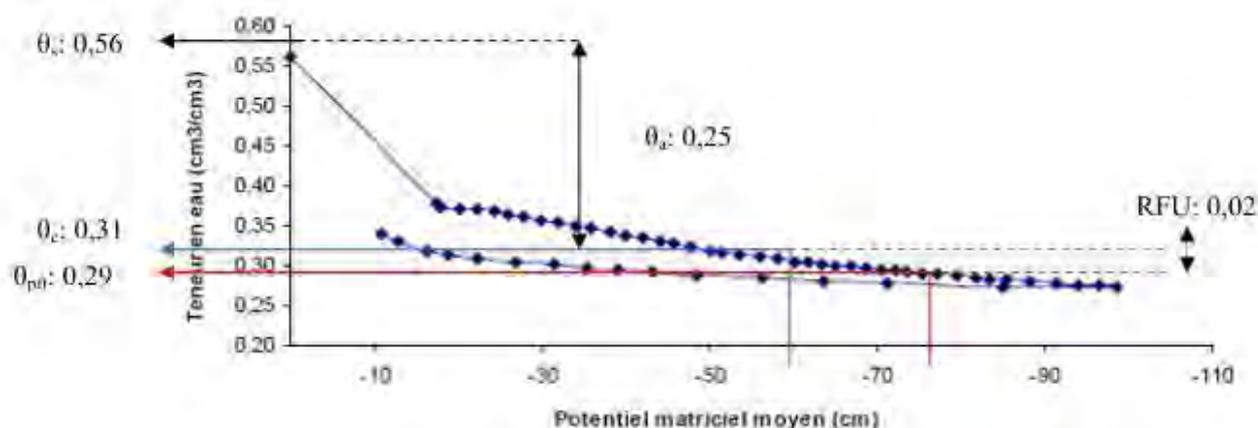


Figure 14. Courbes de rétention d'eau en désorption et sorption représentatives pour le champ à l'étude.

2.5.8.3 Teneur en air (θ_a)

La teneur en air du sol fournit des indications sur l'aération des racines. Une bonne aération est essentielle pour l'obtention de bons rendements. En effet, si le sol contient moins de 10 % ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) d'air, il y a anoxie. Par contre, plus le sol est exposé à l'oxygène, plus il s'oxyde et se dégrade. La valeur de teneur en air moyenne calculée pour le sol à l'étude, soit 29 %, indique que le sol assure une bonne aération aux racines.

2.5.8.4 Conductivité hydraulique saturée (K_s)

La conductivité hydraulique saturée d'un sol décrit le mouvement de l'eau dans un sol à saturation. Même s'il est plutôt rare que les champs soient à saturation, cette valeur permet de prédire les taux d'infiltration et de drainage de l'eau dans un sol suite à une pluie intense ou prolongée. Une faible conductivité hydraulique saturée augmente les risques d'érosion hydrique puisqu'elle entraîne en surface l'accumulation de l'eau qui ne peut s'infiltrer dans le sol. Cette accumulation d'eau génère un ruissellement rapide suite à une pluie continue ou intense. De plus, ces sols sont lents à se drainer suite à une saturation. L'eau reste donc longtemps à la surface des sols, limitant ainsi l'aération des cultures. Si les cultures sont asphyxiées trop longtemps, cela peut causer une perte de rendement considérable.

La conductivité hydraulique moyenne pour ce sol est de $0,01 \text{ cm s}^{-1}$, soit légèrement supérieure à la valeur généralement véhiculée dans la littérature pour un sol sableux de $0,0057 \text{ cm s}^{-1}$. À titre comparatif, la valeur proposée pour une argile est de $0,000017 \text{ cm s}^{-1}$.

À titre complémentaire, la figure 15 représente la cartographie du mouvement de l'eau à la surface du champ lorsque le sol est saturé en eau. Cette carte a été réalisée à partir des relevés topographiques effectués en plusieurs points (figure 16). Les points jaunes représentent les 30 tensiomètres qui étaient installés dans le champ. Les zones aux contours bleus représentent des mini-bassins versant où la direction d'écoulement de l'eau est indiquée avec les lignes jaunes. Les zones dont le contour est rose indiquent où il serait possible d'apercevoir des accumulations d'eau. Toutefois, l'écoulement de l'eau suggéré par cette carte s'applique difficilement lorsque la saison de culture est débutée. En effet, la disposition longitudinale des rangs de pommes de terre influence à son tour l'écoulement de l'eau.

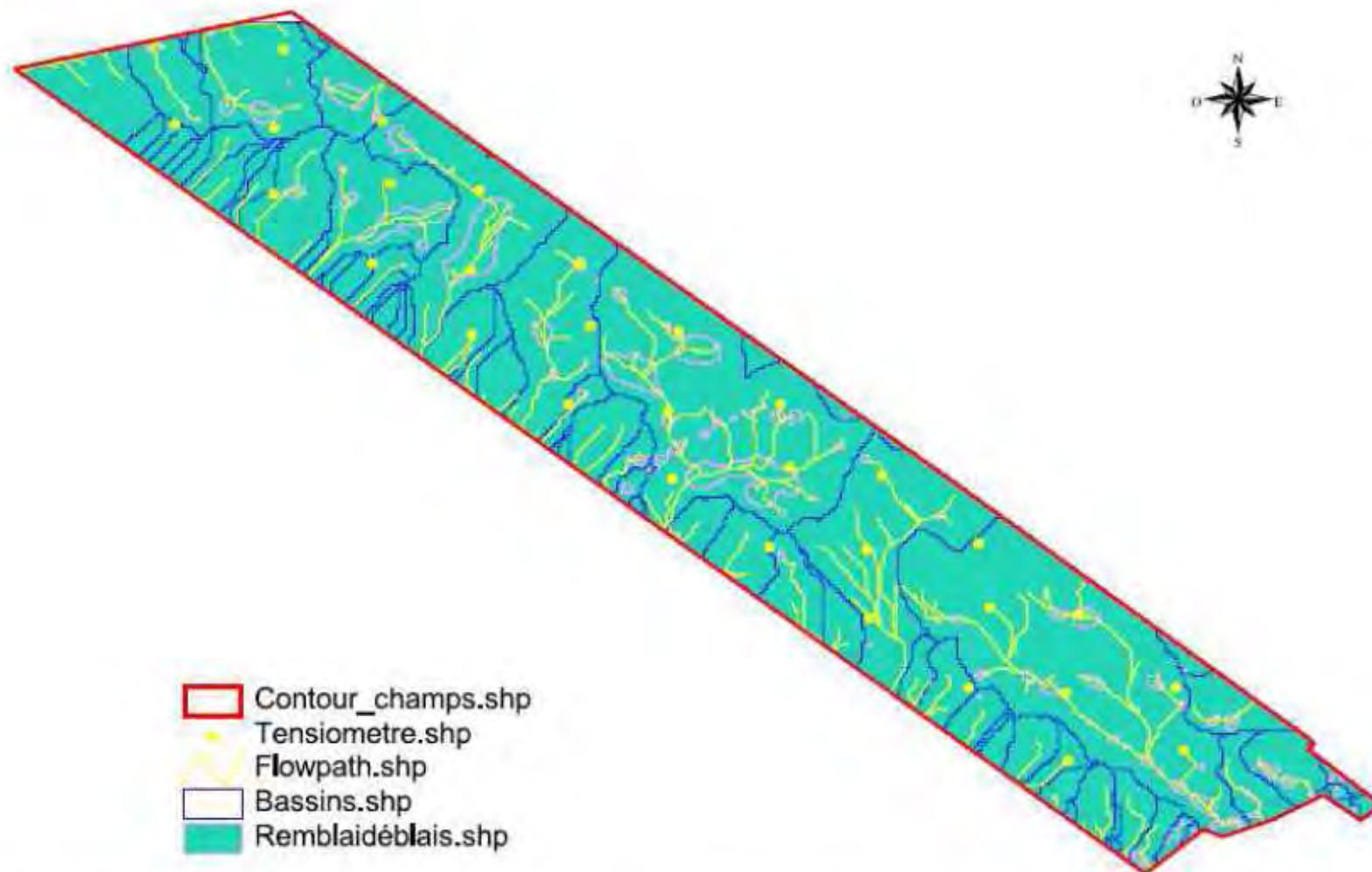


Figure 15. Direction de l'écoulement des eaux de surface en condition de sol saturée.



Figure 16. Relevé topographique du champ à l'étude.

2.5.8.5 Densité apparente (ρ_a) et réelle (ρ_r)

La densité d'un sol est un paramètre important à connaître puisqu'elle renseigne sur la compaction du sol. Plus un sol est compacté, plus la porosité diminue et plus la densité augmente. En effet, la macroporosité, responsable de la percolation de l'eau et de l'aération, est affectée lors du compactage du sol, ce qui peut entraîner des pertes de rendements substantielles pour la culture.

Il existe deux sortes de densités. La densité apparente du sol correspond au poids du sol par unité de volume de sol sec en place et varie de 1,0 à 1,6 g cm⁻³ pour les sols minéraux (CRAAQ 2003). Généralement, un sol sableux bien structuré aura une densité apparente de 1,3 g cm⁻³ dans l'horizon cultivé et de 1,4 g cm⁻³ dans les couches subséquentes. La valeur moyenne pour ce champ, soit 1,2 g cm⁻³, indique que ce sol a une bonne structure. Au-delà de ces valeurs, le sol risque d'être diagnostiqué comme compacté, bien que d'autres paramètres doivent être pris en considération. Quant à la densité réelle d'un sol, dont les valeurs oscillent entre 2,2 et 2,7 g cm⁻³, elle fait abstraction de la porosité et se définit comme étant le poids réel de la matière constitutive de ce sol. La connaissance de la densité réelle est utile lorsqu'on désire connaître la porosité totale d'un sol, cette dernière étant obtenue par la différence entre la densité réelle et la densité apparente.

2.5.8.5.1 Synthèse de l'analyse des résultats pour cet objectif

En théorie, le déclenchement de l'irrigation devrait se faire à la tension correspondant au point de flétrissement temporaire (θ_{ptf}) qui est d'environ 7,5 kPa pour ce sol sableux. Une tension supérieure à ce point suppose que la plante subit un stress hydrique, car la réserve facilement utilisable en eau du sol (RFU) est épuisée. À partir du calcul de la RFU, il a été possible d'estimer le volume d'eau à appliquer sans qu'il y ait de perte d'eau par lessivage. La RFU pour ce sol est de 0,02 cm cm⁻³. Cette valeur multipliée par la profondeur des racines renseigne sur la capacité de ce sol à retenir l'eau sans causer de perte dans l'environnement. Donc, 30 cm de sol devrait retenir 6 mm d'eau, ce qui est inférieure à la valeur véhiculée dans la littérature pour ce type de sol.

Enfin, la densité apparente (ρ_a) de 1,20 g cm⁻³ et la teneur en air (θ_a) de 29 % de ce sol suggèrent que les excès d'humidité possiblement en cause dans la diminution des rendements dans certaines zones sont dus à un apport excédentaire d'eau par la pluie et l'irrigation et non par un problème de structure du sol.

3 IMPACT

3.1 Impact sur le secteur

Ce projet a un impact majeur sur la gestion de l'eau d'irrigation. Il démontre que même lorsqu'une irrigation uniforme est appliquée, les apports d'eau peuvent être inadéquats puisque les teneurs en eau du sol au champ sont variables et suivent des patrons structurés qui exigent l'ajustement des quantités d'eau appliquées selon les secteurs. Le projet démontre donc que l'on pourrait augmenter les rendements vendables en tenant compte de ces patrons d'humidité. Cette nouvelle approche est transférable puisque la présence de patrons structurés se retrouve probablement dans une majorité de champ sous irrigation au Québec. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet pourront donc profiter à l'ensemble du secteur de la production de la pomme de terre et à plusieurs cultures maraîchères qui ont recours à l'irrigation au Québec.

Par ailleurs, ce projet sensibilise les producteurs et les conseillers agricoles à l'importance stratégique de tenir compte des besoins différentiels qui peuvent exister dans un champ selon les propriétés physiques du sol dans la gestion de l'eau d'irrigation.

Le projet proposé a donc permis d'acquérir des connaissances qui contribueront au développement d'un savoir-faire permettant une gestion de l'irrigation dite de précision menant à une utilisation rationnelle de l'eau tout en tenant compte de la rentabilité pour le producteur et du respect de l'environnement.

3.2 Pérennité du projet

Certes, la pérennité du projet sera assurée par les différents documents qui seront produits et par la disponibilité des intervenants, travaillant dans le secteur publique, qui ont été impliqués dans le projet. De plus, elle sera renforcée par la réalisation du second volet du projet. En effet, les connaissances qui ont été acquises seront mise à profit dès le printemps 2008 dans le cadre du projet intitulé « Irrigation de la pomme de terre sous une gestion locale et globale en lien avec les rendements et la perte des nitrates » qui aura lieu dans le même champ et qui prendra fin en 2011. Par ailleurs, l'expérience et les connaissances acquises par les producteurs exploitant le site où était réalisé le projet assureront également sa diffusion.

4 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier messieurs Victorin et Norbert Drolet de la Ferme Victorin Drolet inc. et M. Jean Noreau du MAPAQ, pour leur collaboration au projet. Nos remerciements s'adressent également à Mme Michèle Grenier de l'IRDA pour sa précieuse collaboration dans l'analyse statistique des données et aux entreprises HORTAU et Dubois Agrinovation pour leur soutien technique et leur participation financière au projet.

Enfin, nous désirons remercier le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ) pour avoir contribué au financement du projet par le biais du Programme national d'approvisionnement en eau Canada-Québec (PAECQ) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) et du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).

5 RÉFÉRENCES

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2003. Guide de référence en fertilisation 1^{re} édition, CRAAQ, Sainte-Foy, Québec, 298 p.

Gallichand, J., R.S. Broughton, J. Boivert et P. Rochette. 1990. Simulation of irrigation requirement for major crops in South Western Quebec. *Canadian Agricultural Engineering*, 9 p.

Isaaks, E.H. et R.M. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics, Oxford University Press, New York.

Kramer, P.J. 1983. Water relations of plants. Academic Press, New York, NY.

Taylor, S.A. 1965. Managing irrigation water on the farm. *ASAE* 8:433-435.

6 PLAN DE FINANCEMENT ET CONCILIATION DES DÉPENSES

Cette section sera complétée et envoyée par le Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec.

ANNEXE 1. Pluviométrie

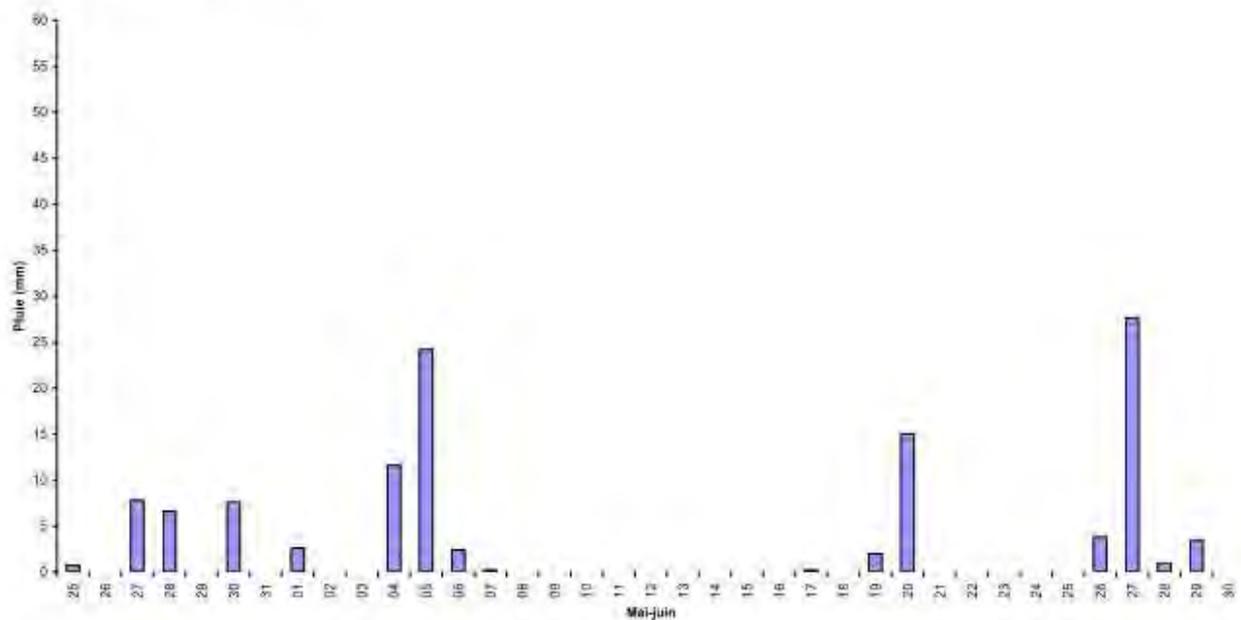


Figure 17. Pluviométrie mesurée sur le site à l'étude du 25 mai au 30 juin 2007.

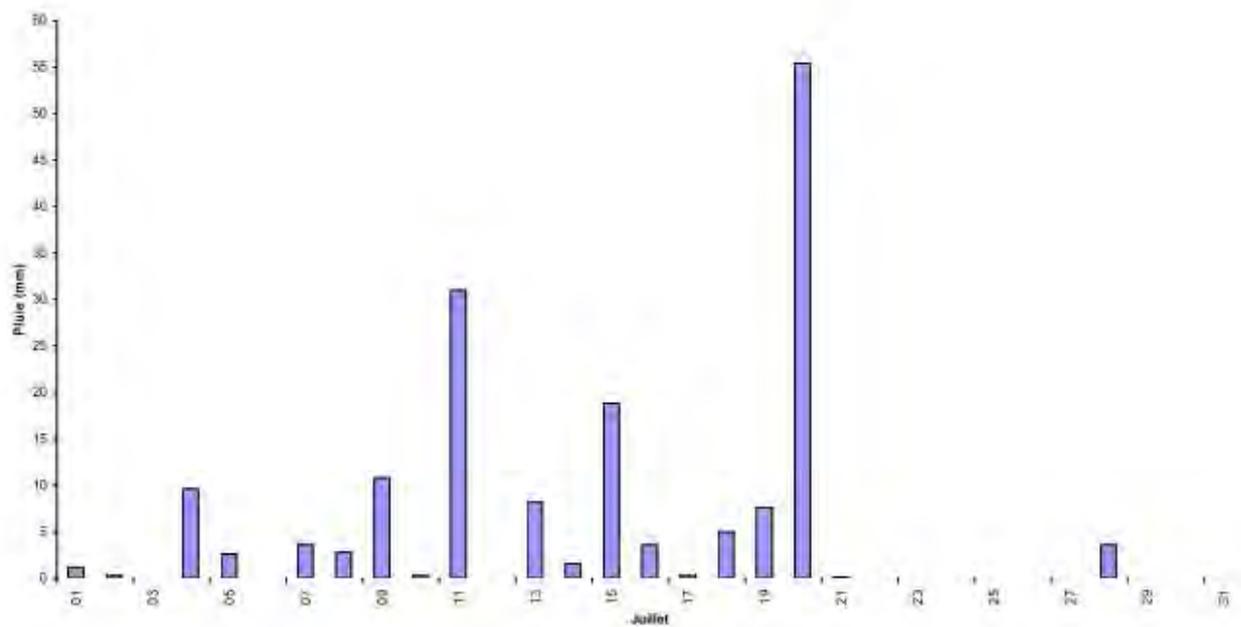


Figure 18. Pluviométrie mesurée sur le site à l'étude en juillet 2007.

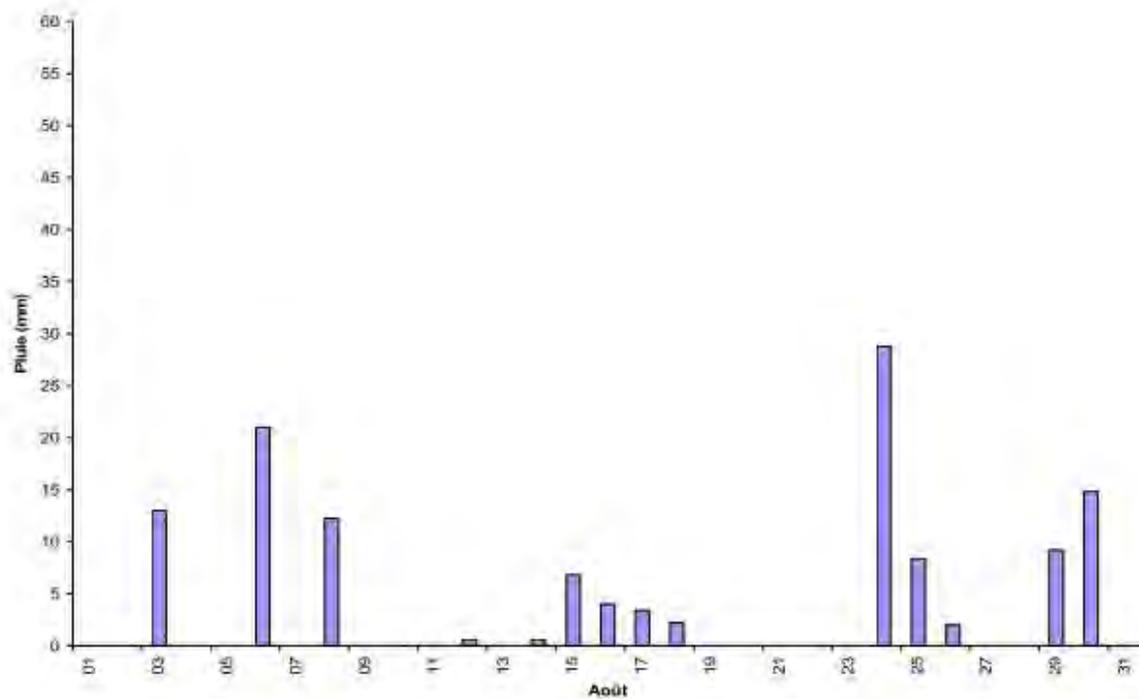


Figure 19. Pluviométrie mesurée sur le site à l'étude en août 2007.

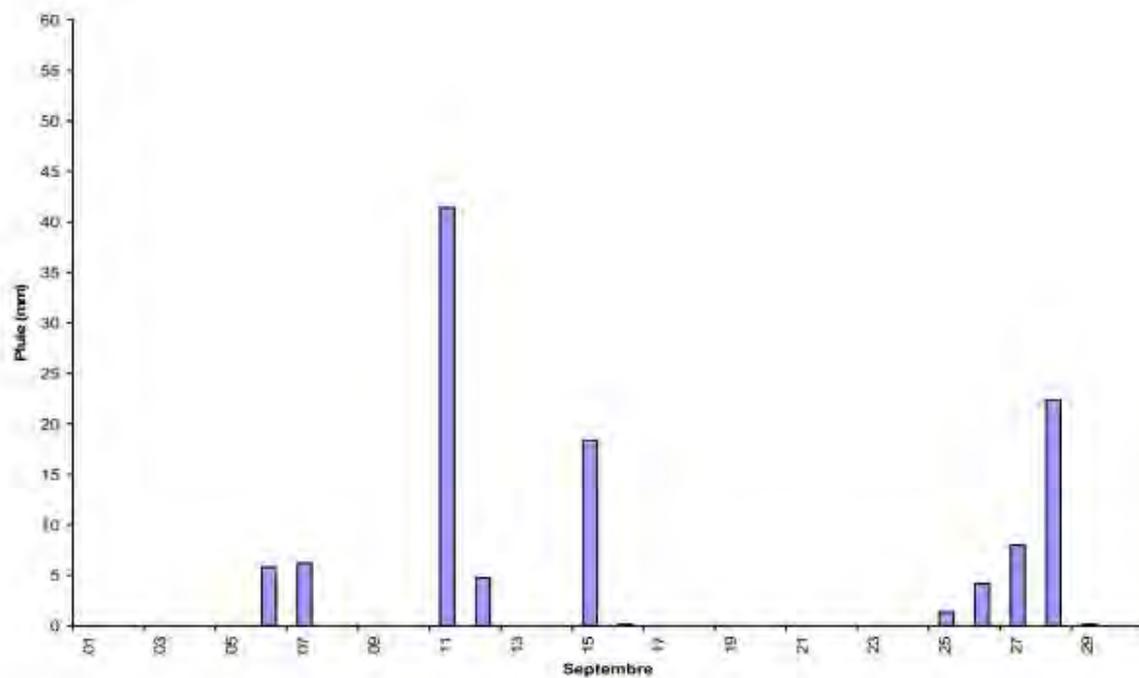


Figure 20. Pluviométrie mesurée sur le site à l'étude en septembre 2007.

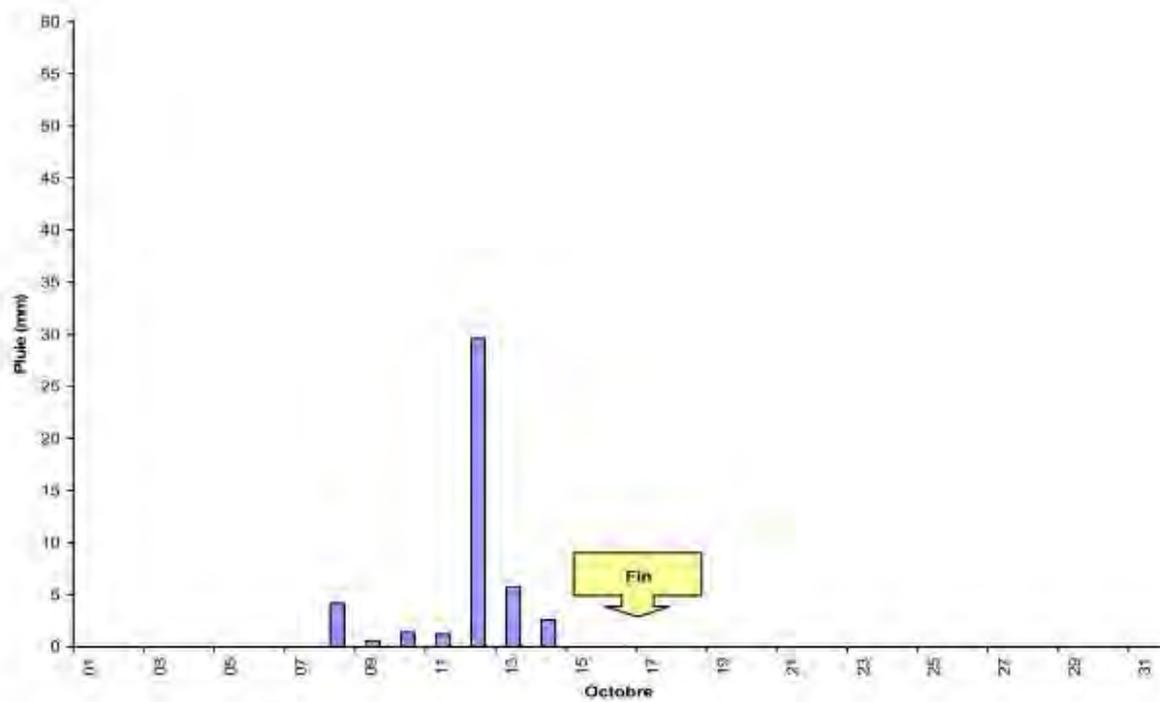


Figure 21. Pluviométrie mesurée sur le site à l'étude du 1^{er} au 17 octobre 2007.

ANNEXE 2. Photos



Figure 22. Champ à l'étude.



Figure 23. Tensiomètre sans fil (Hortimètre T-80).

