



# Impact de l'irrigation sur la dynamique de l'azote du sol, la nutrition, le rendement et la qualité du bleuet en corymbe en implantation

**Projet # 6254**



**Rapport final**

Avril 2008 à mars 2011

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

Avec la collaboration de  
Paul Deschênes, agr., M.Sc. – IRDA  
Julie Mainguy, agr. – IRDA  
Danièle Pagé, tech. agricole – IRDA  
Stéphane Nadon, tech. agricole – IRDA  
Daniel Bergeron, agr., M.Sc. – MAPAQ DRCN  
Stéphanie Tellier, agr., M.Sc. – MAPAQ DRCN

Octobre 2011

## Équipe de réalisation

Christine Landry	Chercheure, IRDA
Carl Boivin	Chercheur, IRDA
Paul Deschênes	Professionnel de recherche, IRDA
Julie Mainguy	Attachée de recherche, IRDA
Danièle Pagé	Technicienne agricole, IRDA
Stéphane Nadon	Technicien agricole, IRDA
Michèle Grenier	Statisticienne, IRDA
Daniel Bergeron	Conseiller en horticulture, MAPAQ DRCN
Stéphanie Tellier	Conseillère en horticulture, MAPAQ DRCN
Ginette Laplante	Consultante privée
Jocelyn Boudrias	Technicien agricole
Pierre-Yves Pettigrew	Étudiant d'été en génie agrœnvironnement
Étienne Rousseau	Étudiant d'été en génie agrœnvironnement
Mathieu Bernier-Therrien	Étudiant d'été en agronomie
Jessica Dagenais	Étudiant d'été en biologie
Marc-Antoine Robert	Étudiant d'été en agronomie
Rosemary Allen	Étudiant d'été en agrœnvironnement
Noélie Hébert Tardif	Étudiant d'été en biologie

## Table des matières

1	SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET .....	6
2	DESCRIPTION DU PROJET.....	7
2.1	Objectif général.....	8
2.2	Objectifs spécifiques .....	8
3	MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	9
3.1	Mise en place de l'expérience .....	9
3.2	Traitements .....	11
3.3	Dispositif expérimental.....	12
3.4	Collecte des données.....	14
3.5	Analyses statistiques des données.....	15
4	RÉSULTATS ET ANALYSE .....	16
4.1	Caractérisation des propriétés physiques du sol et développement de critères de gestion de l'eau d'irrigation accessibles et facilement utilisables en conditions de production commerciale.....	16
4.2	Taux d'utilisation de l'eau d'irrigation, qualité d'implantation et développement des plants..	18
4.3	Impact des diverses consignes d'irrigation sur les indicateurs de productivité .....	23
4.3.1	Nombre de fleurs produites selon le traitement .....	23
4.3.2	Efficacité d'utilisation de l'eau.....	24
4.4	Incidence des maladies racinaires du bleuet en corymbe causées par <i>Phytophthora</i> et <i>Pythium</i> selon les régimes hydriques .....	26
4.5	Flux <i>in situ</i> des ions $\text{NH}_4^+$ et $\text{NO}_3^-$ et contenu en $\text{N}_{\text{tot}}$ du sol selon la fertilisation azotée et les diverses consignes d'irrigation .....	26
4.5.1	Membranes d'échange ionique .....	26
4.5.2	Contenu en N du sol.....	34
4.6	Statut nutritionnel des plants selon la fertilisation azotée et les diverses consignes d'irrigation .....	38
4.7	Diffusion des résultats.....	41
5	CONCLUSIONS.....	43
6	REMERCIEMENTS.....	44
7	BIBLIOGRAPHIE.....	45

## Liste des figures

Figure 1. Bleuetière de Deschambault, juillet 2009. ....	10
Figure 2. Installation du 2 <sup>e</sup> tube de goutte-à-goutte au printemps 2009. ....	10
Figure 3. Schéma du dispositif expérimental (plan en blocs aléatoires complets). ....	12
Figure 4. Action des membranes d'échange au champ. ....	13
Figure 5. Placement des membranes d'échange au champ. ....	13
Figure 6. Contenu en eau du sol pour différentes valeurs de tension. ....	16
Figure 7. Contenu en eau du sol à différents points repères. ....	17
Figure 8. Évolution de la hauteur des plants (relatif) en 2009 selon le traitement (I, consigne de déclenchement de l'irrigation en pourcentage de la RU; N <sub>0</sub> , aucun apport azoté; N, apport azoté). ....	20
Figure 9. Évolution de la hauteur des plants (relatif) en 2010 selon le traitement (I, consigne de déclenchement de l'irrigation en pourcentage de la RU; N <sub>0</sub> , aucun apport azoté; N, apport azoté). ....	20
Figure 10. Hauteur des plants (cm) à l'automne 2010 (I, consigne de déclenchement de l'irrigation en pourcentage de la RU; N <sub>0</sub> , aucun apport azoté; N, apport azoté). ....	22
Figure 11. Nombre moyen de fleurs par plant au printemps 2010 (I, consigne de déclenchement de l'irrigation en pourcentage de la RU; N <sub>0</sub> , aucun apport azoté; N, apport azoté). ....	24
Figure 12. Flux de N-NH <sub>4</sub> et de N-NO <sub>3</sub> au cours de la saison 2009 pour l'ensemble des traitements indifféremment de la régie d'irrigation ou de la fertilisation azotée. ....	28
Figure 13. Flux de N-NH <sub>4</sub> et de N-NO <sub>3</sub> au cours de la saison 2010 pour l'ensemble des traitements indifféremment de la régie d'irrigation ou de la fertilisation azotée. ....	28
Figure 14. Flux de N-NH <sub>4</sub> au cours des saisons 2009 et 2010 des traitements non fertilisés (en rouge) et fertilisés (en bleu) indifféremment de la régie d'irrigation (+ N = apport d'engrais N). ....	30
Figure 15. Flux de N-NO <sub>3</sub> au cours des saisons 2009 et 2010 des traitements non fertilisés (en rouge) et fertilisés (en vert) indifféremment de la régie d'irrigation (+ N = apport d'engrais N). ....	30
Figure 16. Cycle de transformation de l'azote. ....	31
Figure 17. Flux de N-NH <sub>4</sub> et de N-NO <sub>3</sub> des parcelles fertilisées au cours de la saison 2009 en fonction de la consigne d'irrigation. ....	31
Figure 18. Flux de N-NH <sub>4</sub> des parcelles fertilisées au cours de la saison 2010 en fonction de la consigne d'irrigation. ....	33
Figure 19. Flux de N-NO <sub>3</sub> des parcelles fertilisées au cours de la saison 2010 en fonction de la consigne d'irrigation. ....	34
Figure 20. Contenu en N-NO <sub>3</sub> (KCl) de la strate 0-20 cm de sol selon la fertilisation et les consignes d'irrigation en 2009. ....	36
Figure 21. Contenu en N-NO <sub>3</sub> (KCl) de la strate 0-20 cm de sol selon la fertilisation et les consignes d'irrigation en 2010. ....	37
Figure 22. Contenu en N <sub>total</sub> des feuilles de bleuétiers, selon la fertilisation azotée et la consigne d'irrigation en 2009. La ligne transversale rouge indique le seuil minimal adéquat de N. ....	39
Figure 23. Contenu en N <sub>total</sub> des feuilles de bleuétiers, selon la fertilisation azotée et la consigne d'irrigation en 2010. La ligne transversale rouge indique le seuil minimal adéquat de N. ....	39

## Liste des tableaux

Tableau 1. Source et séquence d'application des engrais N, K, Mg et B au cours des trois années d'essais.....	11
Tableau 2. Nombre d'épisodes effectués d'irrigation en 2009 selon le traitement et la période..	18
Tableau 3. Nombre d'épisodes effectués d'irrigation en 2010 selon le traitement et la période..	18
Tableau 4. Volume d'eau d'irrigation appliqué selon la saison et le gain en hauteur des bleuetiers et le nombre de fleurs produites selon le traitement. ....	24
Tableau 5. Litres d'eau appliqués par l'irrigation selon le gain en hauteur des plants et le nombre de fleurs produites.....	25
Tableau 6. Contenu en azote total et éléments majeurs et mineurs disponibles dans la strate 0-20 cm de sol en 2009 et 2010 <sup>†</sup> . ....	36

# 1 SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET

Le bleuetier en corymbe est sensible à la sécheresse et se cultive généralement dans des sols à drainage rapide ayant une faible capacité de rétention en eau. L'irrigation y est donc une pratique courante. Pourtant, les producteurs ne disposent pas de consigne de références pour en raisonner la gestion. Un projet impliquant l'IRDA, le MAPAQ DRCN et HORTAU a donc été réalisé à la Station de recherche de Deschambault. Celui-ci visait à gérer l'irrigation de sorte à optimiser l'utilisation de l'eau et de l'azote (N) durant les années suivant l'implantation. En 2008, 1300 bleuetiers ont donc été implantés et soumis, en 2009 et 2010, aux régies d'irrigation. Ces dernières différaient entre elles selon la proportion (50, 70 et 90 %) de la réserve en eau utile (RU) du sol qui était maintenue disponible à la plante. Durant ces deux saisons, le statut nutritionnel et le développement des plants ont été suivis. De plus, en 2011, les fleurs ont été dénombrées. La disponibilité en N (nitrates (N-NO<sub>3</sub>) et ammonium (N-NH<sub>4</sub>)) du sol était également mesurée *in situ* en continu avec des membranes d'échange ionique (MEI).

Cette étude met en évidence la synergie entre la fertilisation en N et le statut hydrique du sol dans le développement du bleuetier. En effet, tant la fertilisation en N que l'irrigation ont influencé le développement végétatif et florifère. À terme, les bleuetiers irrigués et non fertilisés en N (I<sub>70%</sub>-N<sub>0</sub>) ont produit une hauteur et un nombre de fleurs comparables à ceux non irrigués et fertilisés en N (I<sub>0%</sub>-N). Cependant, la meilleure productivité a été mesurée chez les plants fertilisés en N où la disponibilité de l'eau du sol était maintenue la plus élevée (I<sub>90%</sub>-N). De plus, ce sont les plants fertilisés les plus irrigués F (I<sub>90%</sub>-N) qui tendent à donner la meilleure productivité (hauteur et fleurs). Par contre, en terme d'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation, les plants du traitement D (I<sub>50%</sub>-N) se démarquent avec 0,9 litres d'eau appliqués par fleur produite, comparativement à 1,2 litres pour les plants des traitements F (I<sub>90%</sub>-N). De plus, en ce qui a trait au gain en hauteur, les plants du traitement D (I<sub>50%</sub>-N) performant encore avec 11,8 litres appliqués par cm de gain en hauteur (hauteur finale – initiale), comparativement à 38,8 litres pour les plants du traitement F (I<sub>90%</sub>-N). Quoiqu'il en soit, il demeure tout de même que les plants du traitement F ont significativement produit 35% plus de fleurs que ceux du traitement D.

Par ailleurs, le suivi du N disponible en solution du sol et du statut nutritionnel des plants suggèrent que les bénéfices de l'irrigation auraient peut-être été bonifiés si l'apport en N avait été plus élevé. En effet, les analyses foliaires indiquent que les plants fertilisés en N ont globalement manqué de cet élément en 2010, et que ce sont les plants les plus irrigués (I<sub>90%</sub>-N) qui présentent la plus forte baisse. Leur développement plus important pour une même fertilisation peut expliquer ceci. Ces plants ont d'ailleurs puisé le plus activement les N-NO<sub>3</sub> dans la solution du sol, mais cela ne semble pas avoir été suffisant. Ainsi, la fertilisation en N devrait tenir compte de la pratique de l'irrigation. D'autant plus que cette étude démontre qu'au cours des premières années, alors que le pH du sol continue à s'acidifier, les N-NO<sub>3</sub> jouent un rôle central dans la dynamique du N et ce, malgré l'apport de N minéral sous forme de N-NH<sub>4</sub>. En effet, puisque les ions N-NH<sub>4</sub> ont rapidement été nitrifiés en ions N-NO<sub>3</sub>, l'impact de l'irrigation s'est déplacé sur ces derniers. Or, le N-NO<sub>3</sub> ne se fixe pas aux particules de sol comme le N-NH<sub>4</sub>, ce qui le rend sensible au lessivage. Cette situation renforce l'importance de raisonner la gestion de l'irrigation. Toutefois, davantage d'études devront être réalisées avant d'en arriver à des recommandations précises.

## 2 DESCRIPTION DU PROJET

Les sols légers sont favorables au développement du bleuetier en corymbe. Toutefois, la disponibilité en eau peut rapidement devenir préoccupante pour des sols de cette nature, surtout pour une plante qui a un système racinaire peu développé et superficiel comme c'est le cas pour le bleuetier. En effet, la réserve utile (RU) en eau de ces sols est faible, ce qui augmente le risque pour la plante de subir des épisodes de stress hydrique. De plus, la nature de ces sols leur confère des propriétés particulièrement drainantes, qui sont favorables au lessivage des nitrates en profondeur. Conséquemment, de cette problématique émergent des préoccupations d'ordre économique et environnemental.

Le prélèvement par la plante des nutriments présents dans le sol est lié à l'absorption de l'eau par les racines. Ainsi, la nutrition des plants peut également être un aspect limitant de la productivité des bleuetiers, car bien que cette plante soit peu exigeante en nutriments, son système racinaire peu développé restreint son efficacité à absorber les éléments nutritifs. La disponibilité des éléments nutritifs et leur localisation dans le profil de sol sont donc des paramètres déterminants du statut nutritionnel des plants. Les problèmes associés à l'établissement des plants, incluant une croissance déficiente et un déficit nutritionnel, sont ainsi le plus souvent reliés aux conditions de sol (Baker et coll., 1988). L'impact potentiel de l'irrigation sur la chimie du sol ou sur l'activité des microorganismes du cycle de l'azote (N), et incidemment sur la dynamique du N et le ratio des formes disponibles de N en solution de sol, aura un effet important non seulement sur la nutrition azotée, mais aussi sur le développement du plant, en plus d'influencer la disponibilité de bien d'autres nutriments essentiels pour le bleuetier.

Présentement, aucune donnée traitant spécifiquement du volume d'eau nécessaire au développement optimal des plants, ainsi que sur l'impact de la disponibilité de l'eau dans les années suivant l'implantation sur le devenir de la production, n'est disponible en conditions culturelles québécoises. De plus, il n'existe à notre connaissance, aucune information sur l'impact de la régie d'irrigation sur la dynamique du N disponible du sol en lien avec le statut nutritionnel azoté des plants et leur développement sous les conditions québécoises. Considérant les coûts élevés nécessaires à l'implantation d'une bleuetière et ceux reliés à la mise en place d'un système d'irrigation et de sa gestion, ce type d'information s'avère toutefois essentiel pour augmenter la rentabilité de cette production. Ce projet a donc été initié en ce sens. D'une durée de trois ans, il vise à acquérir et à transmettre des connaissances utiles à la gestion optimale de l'eau et du N du sol et des engrais dans la culture du bleuetier en corymbe au Québec au cours des premières années de croissance suivant l'implantation.

## 2.1 Objectif général

Ce projet a pour but de promouvoir une agriculture durable en participant à l'avancement des connaissances favorisant l'établissement de bonnes pratiques culturales du point de vue environnemental et agronomique.

Globalement, il vise à améliorer la gestion de l'eau d'irrigation dans la culture du bleuet en corymbe en implantation par une utilisation optimale de l'eau et des nutriments du sol afin de rentabiliser au maximum cette pratique culturale tout en préservant au mieux la qualité de l'environnement.

## 2.2 Objectifs spécifiques

- Développer une approche de gestion de l'eau d'irrigation basée sur des critères quantifiables liés aux caractéristiques physiques du sol qui soit accessible et facilement utilisable en conditions de production commerciale;
- Optimiser l'utilisation de l'eau d'irrigation afin d'accroître la qualité de l'implantation (taux de survie) et le développement des plants;
- Estimer l'impact de la pratique de l'irrigation sur les indicateurs de productivité que sont la hauteur des plants et le nombre de fleurs produites;
- Étudier l'impact des différents régimes hydriques sur l'incidence des maladies racinaires du bleuet en corymbe causées par *Phytophthora* et *Pythium*;
- Caractériser l'impact des différentes régies d'irrigation sur le contenu en  $N_{\text{tot}}$  du sol et sur la dynamique *in situ* des ions  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$  afin de développer une approche de gestion de l'irrigation qui favorise la fertilité azotée du sol;
- Étudier le lien entre la régie d'irrigation et le statut nutritionnel (éléments majeurs et mineurs) des plants afin de développer une approche de gestion de l'irrigation qui favorise l'utilisation du N du sol.

### 3 MATÉRIEL ET MÉTHODE

#### 3.1 Mise en place de l'expérience

Cette étude s'est échelonnée sur trois ans. La bleuetière expérimentale a été établie à la Station de recherche de Deschambault au printemps 2008. Cette première saison a servi à la préparation du site et à l'implantation des plants. Les traitements n'ont donc été appliqués qu'au cours des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> années. La texture du sol du site d'essais est un sable loameux dont le pH était de 5,3 en 2009 et de 5,2 en 2010, avec un taux de matière organique de 2,4 % les deux années. Lors de l'implantation, de la mousse de tourbe (57 litres, soit 2 pi<sup>3</sup> par plant sur une superficie de 1 m<sup>2</sup>) a d'abord été déposée dans un sillon de 15 cm de profondeur, puis incorporée au sol à l'aide d'un rotoculteur. Les 1 300 bleuetiers en pot, âgés de 2 ans, ont par la suite été implantés le 12 juin à une densité de 2 380 plants ha<sup>-1</sup> (1,4 m x 3 m). Des plants de quatre cultivars différents ont été implantés. Toutefois, trois cultivars (Chippewa, Northblue et Bluetta) ne servaient qu'à assurer la pollinisation croisée. Les travaux ne portent ainsi que sur un seul cultivar, le Patriot, qui est le plus utilisé au Québec.

Les bleuetiers étaient irrigués au moyen d'un système d'irrigation goutte-à-goutte système d'irrigation a été installé dès la première année (Figure 1 et Figure 2). Cependant, durant cette première saison, une seule régie d'irrigation a été utilisée. Au printemps 2009, une seconde ligne de goutte-à-goutte a été installée de façon à ce qu'il y ait une ligne de part et d'autre de chacun des plants. Au même moment, un système de valves a été mis en place de manière à ce que chacune des parcelles puisse être irriguée individuellement. Les caractéristiques du système d'irrigation utilisé sont les suivantes :

- Diamètre intérieur du tube : 16 mm;
- Espacement entre 2 goutteurs : 30 cm;
- Débit d'un goutteur à 0,69 bar (10 psi) : 0,87 l h<sup>-1</sup>.

La régie de production et le choix des doses d'éléments fertilisants se sont basés sur les recommandations de diverses sources québécoises, ontariennes et américaines pour le bleuet en corymbe (Duval, 1993; Hanson et coll., 1996; Chicoine 2003; Lareau et Urbain, 2008). Les applications de fertilisants ont été faites à la main, au pourtour de chacun des plants. Les engrais et la séquence des apports en N, K et Mg sont présentés au tableau 1. Une application foliaire de bore a également été effectuée pour prévenir les carences et maintenir un développement optimal des plants



**Figure 1.** Bleuétière de Deschambault, juillet 2009.



**Figure 2.** Installation du 2<sup>e</sup> tube de goutte-à-goutte au printemps 2009.

**Tableau 1.** Source et séquence d'application des engrais N, K, Mg et B au cours des trois années d'essais.

Type d'engrais	Année	Date d'application	Dose	
21-0-0	2008	4 juillet	7,5 kg N ha <sup>-1</sup> †	
	2009	29 avril	7,5 kg N ha <sup>-1</sup>	
		4 juin	7,5 kg N ha <sup>-1</sup>	
		2 juillet	10 kg N ha <sup>-1</sup>	
	2010	30 avril	10 kg N ha <sup>-1</sup>	
		27 mai	10 kg N ha <sup>-1</sup>	
		25 juin	10 kg N ha <sup>-1</sup>	
	0-0-22-11	2008	10 juin	180 kg K <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup> 90 kg Mg ha <sup>-1</sup>
		2009	5 mai	120 kg K <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup> 60 kg Mg ha <sup>-1</sup>
20 mai			50 kg K <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup> 25 kg Mg ha <sup>-1</sup>	
2010		20 mai	50 kg K <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup> 25 kg Mg ha <sup>-1</sup>	
2008		-	-	
Solubor 20 %		2009	9 juillet	0,09 kg B ha <sup>-1</sup> (100 ppm foliaire)
	2010	19 juillet	0,09 kg B ha <sup>-1</sup> (100 ppm foliaire)	

† En 2008, toutes les parcelles ont reçu un apport de N, même celles des traitements A et B afin de permettre une reprise adéquate.

### 3.2 Traitements

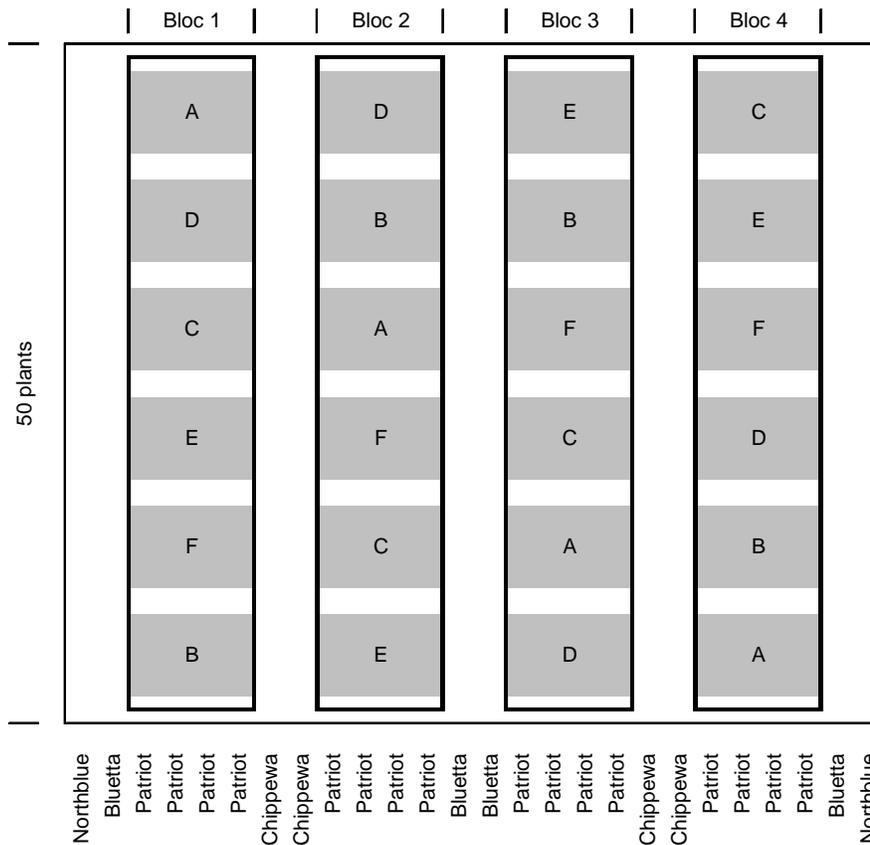
La présente étude comparait six traitements, incluant quatre consignes d'irrigation, ainsi que des témoins non fertilisés en azote afin de pouvoir évaluer l'impact de l'irrigation non seulement sur le N des engrais, mais également sur la fourniture naturelle en N du sol. Les six traitements étaient les suivants :

- A. Témoin non irrigué et non fertilisé en azote (I<sub>0%</sub>-N<sub>0</sub>);
- B. Témoin irrigué à 70 % de la réserve utile en eau du sol (RU) et non fertilisé en azote (I<sub>70%</sub>-N<sub>0</sub>);
- C. Témoin non irrigué et fertilisé en azote (I<sub>0%</sub>-N);
- D. Irrigation à 50 % de la RU et fertilisé en azote (I<sub>50%</sub>-N);
- E. Irrigation à 70 % de la RU et fertilisé en azote (I<sub>70%</sub>-N);
- F. Irrigation à 90 % de la RU et fertilisé en azote (I<sub>90%</sub>-N).

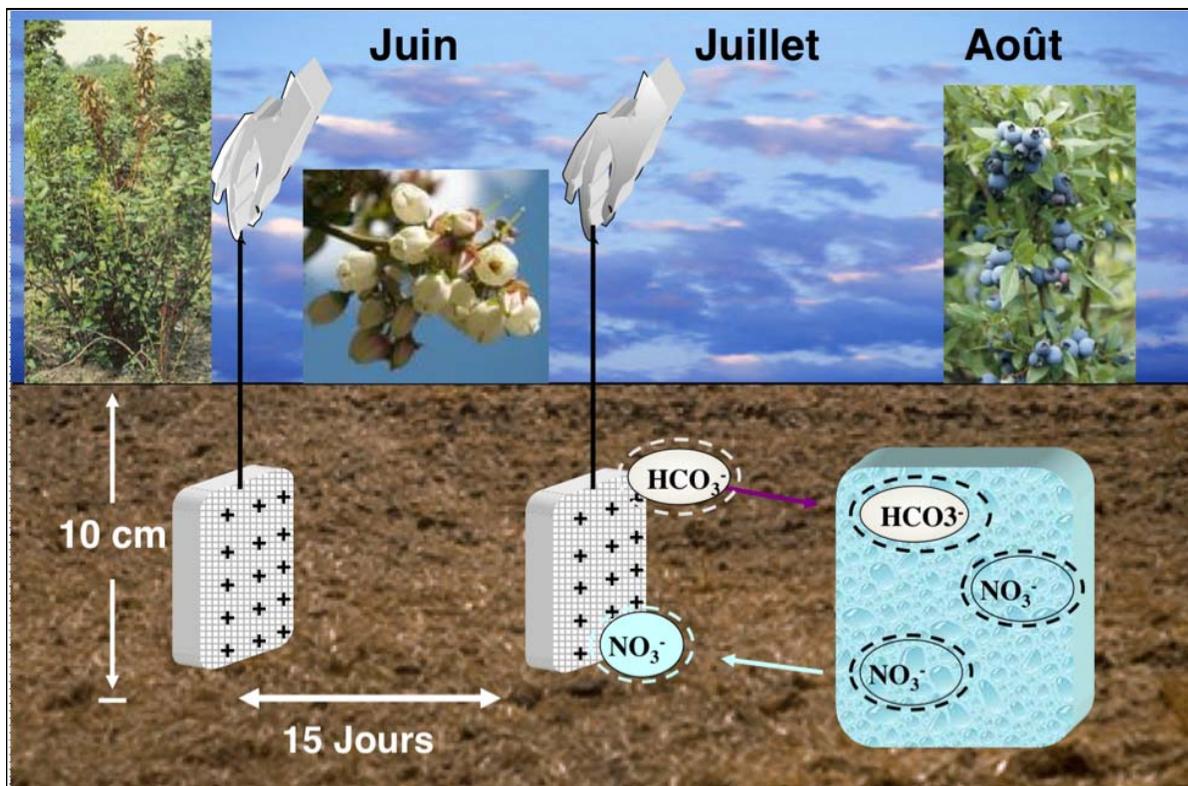
Ces traitements ont été déterminés en fonction des propriétés physiques du sol dont la caractérisation a fait l'objet du premier objectif de l'étude (section 4.1)

### 3.3 Dispositif expérimental

Les 6 traitements à l'étude ont été assignés selon un dispositif en blocs aléatoires complets (Figure 3) comprenant 4 répétitions pour un total de 24 parcelles. La figure 3 illustre le dispositif. Chacune des parcelles (zone grise) est composée de 24 plants du cultivar Patriot, soit 4 rangées de 6 plants. Les cultivars Northblue, Chippewa et Bluetta servent de rangs de garde entre les blocs. La superficie totale de la bleuëtière est de 5 460 m<sup>2</sup> (26 rangées de 70 m de longueur). Chacune des parcelles a été équipée de son propre tensiomètre et de trois paires de membranes d'échange ionique (MEI). Chacune des paires contient une membrane anionique pour capter le N-NO<sub>3</sub> (AR204-SZRA, Ionics Inc., Watertown, MA) et une membrane cationique pour capter le N-NH<sub>4</sub> (CR67-HMR, Ionics Inc., Watertown, MA). Les MEI, mesurant 5,4 x 2,4 cm, ont été insérées verticalement dans la couche utile de sol de façon à couvrir du 15<sup>e</sup> au 20<sup>e</sup> cm de profondeur. Ces MEI, faites de vinyle, contiennent des groupements chargés saturés d'un contre-ion qui sera relâché dans le sol en échange des ions ciblés pour lesquels les groupements possèdent une affinité beaucoup plus grande, assurant leur sorption et leur retenue jusqu'au recouvrement des MEI du champ et leur extraction au laboratoire. Les MEI sont laissées au champ pour une période de deux semaines et sont par la suite échangées pour de nouvelles selon le nombre fixé de semaines d'étude. Les quantités d'ions dosés sont donc exprimées par unité de surface de MEI par période de contact continu ( $\mu\text{g cm}^{-2} \text{ 2 semaines}^{-1}$ ).



**Figure 3.** Schéma du dispositif expérimental (plan en blocs aléatoires complets).



**Figure 4.** Action des membranes d'échange au champ.



**Figure 5.** Placement des membranes d'échange au champ.

### 3.4 Collecte des données

À partir de la 2<sup>e</sup> saison, et lors de la 3<sup>e</sup>, la disponibilité en eau du sol de chacune des 24 parcelles a été mesurée en continu avec des tensiomètres à communication sans fil (modèle Tx80 d'HORTAU) installés dans chacune d'elle. L'irrigation a donc été gérée et appliquée individuellement pour chacune des parcelles. Tout au long de la saison, une attention particulière a été portée à tout signe possible de dépérissement des plants afin de déterminer si ce dépérissement serait conséquent aux conditions d'humidité du sol des différents traitements. Grâce aux MEI installées dans chacune des parcelles, les flux de  $\text{N-NO}_3^-$  et de  $\text{N-NH}_4^+$  ont aussi été mesurés *in situ* en continu du 26 mai au 27 octobre en 2009 (11 périodes de 2 semaines) et du 15 avril au 14 octobre en 2010 (13 périodes de 2 semaines). 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. Un suivi de la température dans le sol et à différents niveaux du couvert de neige a aussi été effectué pour l'hiver 2009-2010, nous permettant d'évaluer la protection offerte par la neige et d'amasser des informations supplémentaires en cas de gel des bourgeons.

En tout temps, les analyses de sol ont été réalisées sur des échantillons composites prélevés dans la strate de sol 0-20 cm. Une première caractérisation par bloc a eu lieu au printemps 2008. Par la suite, en 2009 et 2010, les échantillons de sol ont été prélevés dans chacune des parcelles, non seulement au printemps, mais également en saison et à l'automne. Lors de chacun des échantillonnages, les sols ont été placés dans une glacière et conservés à 4 °C jusqu'à leur préparation. Les sols ont été tamisés à 2 mm puis séchés à l'air à 21 °C, excepté ceux servant aux dosages des  $\text{N-NO}_3^-$  et  $\text{N-NH}_4^+$  qui sont effectués sur des sols tamisés frais et rapportés 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  $\text{pH}_{\text{eau}}$  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  $\text{N}_{\text{tot}}$ , préalablement extrait par digestion Kjeldahl, a été déterminé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon (McGill et Figueiredo, 1993). Les  $\text{N-NO}_3^-$  et  $\text{N-NH}_4^+$  des échantillons de sol ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminés par colorimétrie autoanalyseur Technicon. Ceux captés par les MEI ont été désorbés par une solution de KCl 2M et dosés également au 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. Le bore (B) a été extrait à l'eau chaude et dosé par ICP optique (Gupta, 1993). Des échantillons de sol non perturbé ont également été prélevés dans chacun des quatre blocs lors de l'année d'implantation afin d'établir en laboratoire les courbes de désorption en eau des sols et de conductivité hydraulique non saturée (Topp et coll., 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.

Le statut nutritionnel des plants a été suivi à trois reprises durant la saison par des échantillonnages foliaires. Dans la culture du bleuet, l'analyse de la concentration en N des feuilles est en effet reconnue comme un indice très fiable du statut nutritionnel du plant. Dans chacune des parcelles, 10 feuilles ont été prélevées et conservées dans une glacière à 4 °C jusqu'à leur réception au laboratoire. Les feuilles ont ensuite été séchées à 65 °C et broyées à 100

mesh pour former un échantillon composite. Les nitrates et le N ammoniacal ont été extraits à l'eau (Maynard et Kalra, 1993). Le  $N_{\text{tot}}$ , le  $P_{\text{tot}}$ , les éléments majeurs et mineurs ont été extraits selon la méthode Kjeldahl (Isaac et Johnson, 1976). Les formes de N ont été dosées par colorimétrie automatisée sur autoanalyseur Technicon. Le contenu des autres éléments a été déterminé par spectrométrie d'émission au plasma.

Compte tenu de l'architecture buissonnante du bleuetier et de son nombre élevé de tiges, la hauteur des plants a été privilégiée à celle du diamètre du tronc comme mesure pour l'évaluation de la croissance végétative. La hauteur des plants a donc été mesurée au printemps avant le débourrement des bourgeons, à l'automne après l'aoûtement des plants et à quatre autres reprises entre ces deux périodes afin de déterminer les gains en hauteur du cultivar Patriot sous les différentes régions d'irrigation. De plus, en 2009 et 2010, les fleurs ont été supprimées afin d'assurer un développement optimal des plants. Toutefois, en 2010, un décompte de ces dernières a été effectué afin de mesurer un potentiel de production pour la 3<sup>e</sup> saison.

### **3.5 Analyses statistiques des données**

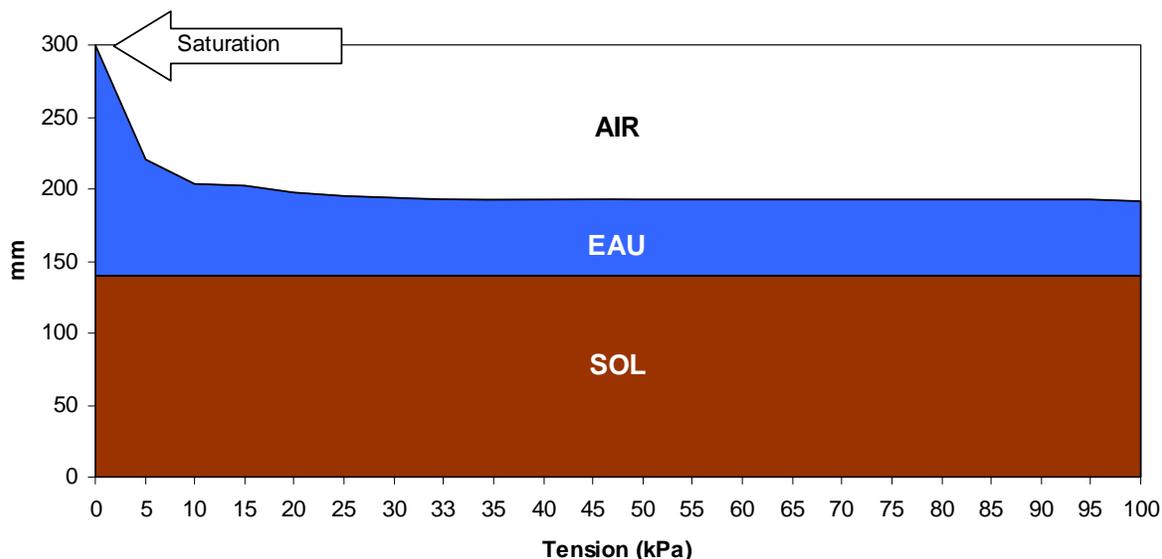
Les analyses ont été effectuées séparément pour les années 2009 et 2010 à l'aide de la procédure MIXED de SAS (Littell et coll., 2006). Un modèle mixte normal a été ajusté pour chaque variable réponse. Pour la plupart des variables, des mesures répétées étaient prises à différentes dates pendant la saison. Les effets fixes de ce modèle étaient donc les traitements, les dates de mesures et l'interaction Date  $\times$  Traitement. L'effet aléatoire des blocs a également été inclus dans le modèle. Pour les variables où les mesures n'ont été effectuées qu'une seule fois, le modèle ne comprenait alors que l'effet fixe du traitement et l'effet aléatoire des blocs. Les corrélations entre les mesures répétées ont été modélisées. Pour chacune des variables réponses, le choix de la structure des corrélations parmi les structures disponibles avec la procédure MIXED a été basé sur le critère AIC (critère d'information d'Akaike). Pour l'analyse de la hauteur et de la croissance des plants en 2009, la hauteur initiale des plants, lors de l'implantation, a été utilisée comme covariable dans le modèle. Les hypothèses d'homogénéité des variances et de normalité de la distribution des erreurs ont été vérifiées au moyen de graphiques de résidus. Pour certaines variables analysées, l'option GROUP=TRAIT a dû être utilisée pour ajuster une variance différente pour chaque traitement. Dans d'autres cas, une transformation LOG a été appliquée. Quelques rares données extrêmes ont été identifiées et retirées du jeu de données.

## 4 RÉSULTATS ET ANALYSE

### 4.1 Caractérisation des propriétés physiques du sol et développement de critères de gestion de l'eau d'irrigation accessibles et facilement utilisables en conditions de production commerciale

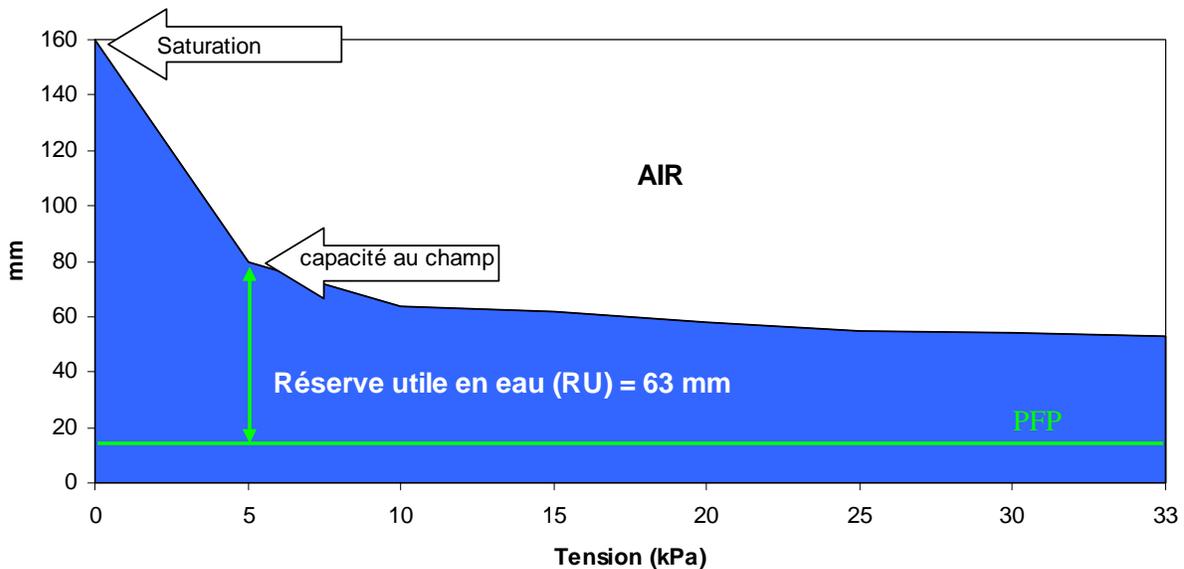
Pour gérer efficacement les apports en eau par l'irrigation, il faut d'abord connaître certaines propriétés physiques du sol en culture et percevoir ce dernier comme un réservoir. Ainsi, il est possible de connaître le volume d'eau que le sol est en mesure d'emmagasiner (capacité de rétention en eau). De plus, l'étendue du système racinaire de la culture renseigne sur les limites du volume du réservoir. Enfin, le statut hydrique du sol au moment de l'apport en eau est utile pour déterminer la durée d'un épisode d'irrigation.

Les 30 premiers centimètres (300 mm) de sol de la bleuetière ont été schématisés à la figure suivante. Selon la nature du sol à cet endroit, environ 50 % de l'espace est occupé par du solide (sol), la balance étant partagée entre l'air et l'eau. Ainsi, lorsque le sol contient 160 mm d'eau, il est saturé en eau (tension de 0 kPa) et tout volume d'eau supplémentaire ne sera pas retenu.



**Figure 6.** Contenu en eau du sol pour différentes valeurs de tension.

De même, étant donné la nature sableuse du sol, 50 % de ce volume sera rapidement drainé en dehors de la zone accessible par les racines. Ainsi, les 80 mm d'eau restants, qui n'ont pas été emportés par la force gravitationnelle, correspondent à la capacité au champ (CC) et constituent la réserve utile en eau (RU) (Figure 7). Les limites de cette réserve sont déterminées par les valeurs de tension (kPa) à la capacité au champ (CC) et au point de flétrissement permanent (PFP). La valeur de tension au PFP est de 1 500 kPa et la valeur de teneur en eau volumique correspondant à cette tension est mesurée à l'aide d'une courbe de désorption en eau qui est propre à chaque sol. En ce qui a trait au sol de la bleuetière, cette valeur est de  $0,0569 \text{ cm}^3$  d'eau par  $\text{cm}^3$  de sol, soit 5,69 %. Toutefois, la disponibilité de cette eau à la plante diminue au fur et à mesure que la tension (kPa) augmente.



**Figure 7.** Contenu en eau du sol à différents points repères.

Une proportion de la RU correspond à la réserve facilement utilisable en eau (RFU). Autrement dit, la disponibilité en eau ne cause aucune contrainte au bon développement de la plante. Toutefois, cette réserve est difficilement identifiable, car elle varie, entre autres, d'une plante à une autre. Ainsi, les différentes régies d'irrigation évaluées dans ce projet ont été déterminées à partir de différentes valeurs de tension comprises entre la CC (5 kPa) et 33 kPa. La consigne la plus sévère, où il y a apport en eau par l'irrigation, est 33 kPa, car après cette valeur il y a un plateau qui s'étend jusqu'au PFP (1500 kPa) (Figure 7). Compte tenu du plateau observé, la portée de l'axe horizontal a été limitée à 33 kPa, afin d'améliorer la qualité du graphique.

En ce qui a trait aux durées des différentes régies, elles ont été déterminées à partir des renseignements présents à la Figure 7. Par exemple, pour la consigne à 33 kPa, il faudra environ 30 mm d'eau pour ramener la tension de l'eau dans le sol à la CC (5 kPa). Conséquemment, selon les caractéristiques du système d'irrigation utilisé, la durée d'un épisode pourra être calculée.

## 4.2 Taux d'utilisation de l'eau d'irrigation, qualité d'implantation et développement des plants

Le nombre effectué d'épisodes d'irrigation, en 2009 et 2010, est présenté au Tableau 2 et au Tableau 3. Ces épisodes sont rapportés selon les périodes où la hauteur des plants a été mesurée. De plus, seuls les traitements B, D, E et F, qui reçoivent des apports en eau, y sont considérés. Dans tous les cas, un épisode d'irrigation représente l'irrigation d'une seule parcelle puisque les quatre parcelles qui font partie d'un même traitement sont irriguées indépendamment, selon que la tension dans le sol atteigne la consigne du traitement. Conséquemment, à l'extrême droite des tableaux, le nombre moyen d'irrigations par traitement (moyenne des 4 parcelles) est également présenté. Enfin, le nombre d'épisodes par période est cumulatif, i.e. qu'il englobe toujours la somme des épisodes des périodes précédentes. Par exemple, au 16 juillet 2009, pour le traitement F (I<sub>90%</sub>-N), trois épisodes d'irrigation avaient été effectués. Au 14 septembre, il y en avait 40 de plus, pour un cumul de 43. Enfin, six épisodes supplémentaires ont été réalisés après le 14 septembre, pour un total de 49 ou 12,3 épisodes pour ce traitement (49 / 4 répétitions). Autrement dit, si cette consigne avait été utilisée en contexte de production commerciale, 12 épisodes d'irrigation auraient été réalisés durant la saison.

**Tableau 2.** Nombre d'épisodes effectués d'irrigation en 2009 selon le traitement et la période.

Traitements <sup>†</sup>	Nombre cumulatif d'irrigations par période					Nb. irrigations moy./ traitement
	< 18 juin	< 16 juill.	< 6 août	< 14 sept.	> 14 sept.	
I <sub>70%</sub> - N <sub>0</sub> (B)	0	0	0	12	15	3,8
I <sub>50%</sub> - N (D)	0	0	0	23	27	6,8
I <sub>70%</sub> - N (E)	0	0	0	26	29	7,2
I <sub>90%</sub> - N (F)	0	3	3	43	49	12,3

<sup>†</sup> I = consigne de déclenchement de l'irrigation en pourcentage de la RU; N = absence ou présence de fertilisation azotée.

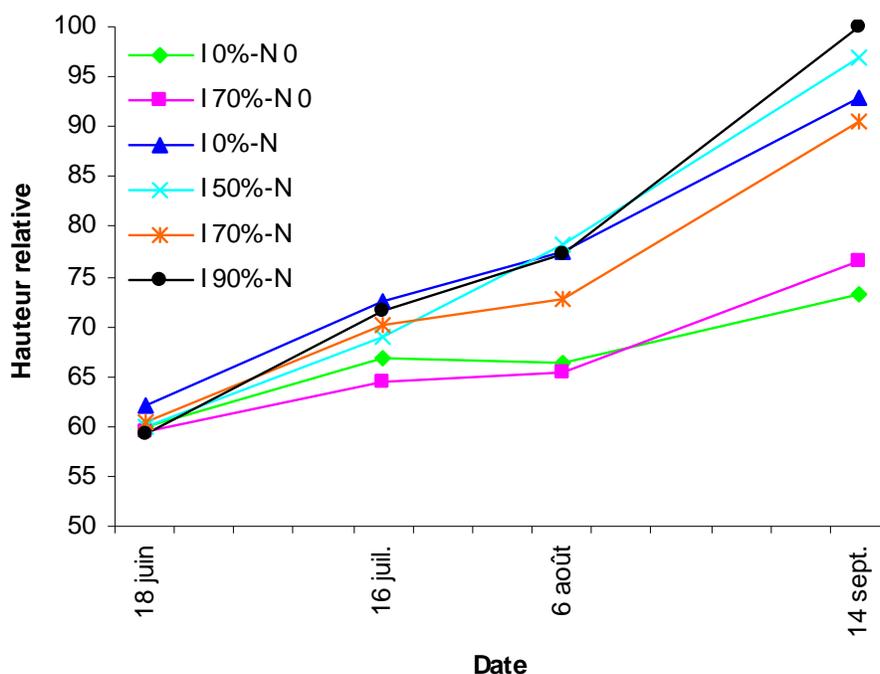
**Tableau 3.** Nombre d'épisodes effectués d'irrigation en 2010 selon le traitement et la période.

Traitements <sup>†</sup>	Nombre cumulatif d'irrigations par période					Nb. irrigations moy./traitement
	< 18 juin	< 16 juill.	< 6 août	< 14 sept.	> 14 sept.	
I <sub>70%</sub> - N <sub>0</sub> (B)	2	7	14	33	33	8,3
I <sub>50%</sub> - N (D)	3	6	8	12	12	3
I <sub>70%</sub> - N (E)	6	17	24	44	44	11
I <sub>90%</sub> - N (F)	14	64	102	147	147	36,8

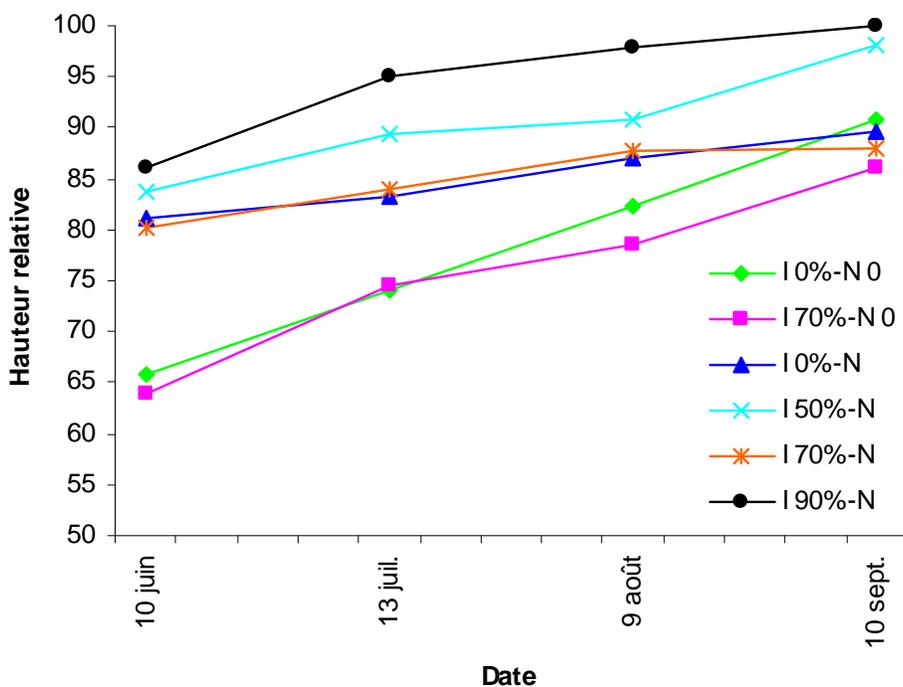
<sup>†</sup> I = consigne de déclenchement de l'irrigation en pourcentage de la RU; N = absence ou présence de fertilisation azotée.

En 2009, hormis le traitement F (I<sub>90%</sub>-N), les premiers épisodes d'irrigation surviennent en août. Cette situation s'explique par la fréquence des précipitations qui ont maintenu les conditions d'humidité du sol sous les seuils de déclenchement de l'irrigation avant cette date. À l'opposé, en 2010, les apports d'eau par irrigation ont débuté tôt pour l'ensemble des traitements et ils se sont poursuivis tout au long de la saison. Tel qu'attendu pour le traitement F (I<sub>90%</sub>-N), pour

lequel la tension de l'eau dans le sol est maintenue la plus faible, le nombre total d'épisodes est le plus élevé, soit 36,8 en moyenne. Par ailleurs, en comparant le nombre moyen d'épisodes d'irrigation pour les traitements B ( $I_{70\%}-N_0$ ) et E ( $I_{70\%}-N$ ), qui ont la même consigne de déclenchement (à 70 % de la RU) mais dont seul le E ( $I_{70\%}-N$ ) est fertilisé en N, on constate que la fréquence est de 1,3 à 2 fois plus élevée selon les années pour le traitement E ( $I_{70\%}-N$ ) par rapport au traitement B ( $I_{70\%}-N_0$ ). Cette différence importante s'explique par l'absence de fertilisation azotée dans le traitement B ( $I_{70\%}-N_0$ ) qui s'est traduite par des gains en hauteur inférieurs à ceux des plants fertilisés (Figure 8 et Figure 9), accompagné probablement d'une consommation d'eau moindre. Enfin, puisque les besoins en eau ont été plus importants pour les plants ayant reçu des apports en azote, cela suggère que la fertilisation azotée module les besoins en eau du bleuetier et donc, que cet aspect devrait être pris en compte dans la gestion de l'irrigation. En effet, si selon l'âge de la bleuetière les besoins en fertilisation sont modifiés, un ajustement de l'irrigation serait peut-être à envisager.



**Figure 8.** Évolution de la hauteur des plants (relatif) en 2009 selon le traitement (I, consigne de déclenchement de l'irrigation en pourcentage de la RU; N<sub>0</sub>, aucun apport azoté; N, apport azoté).

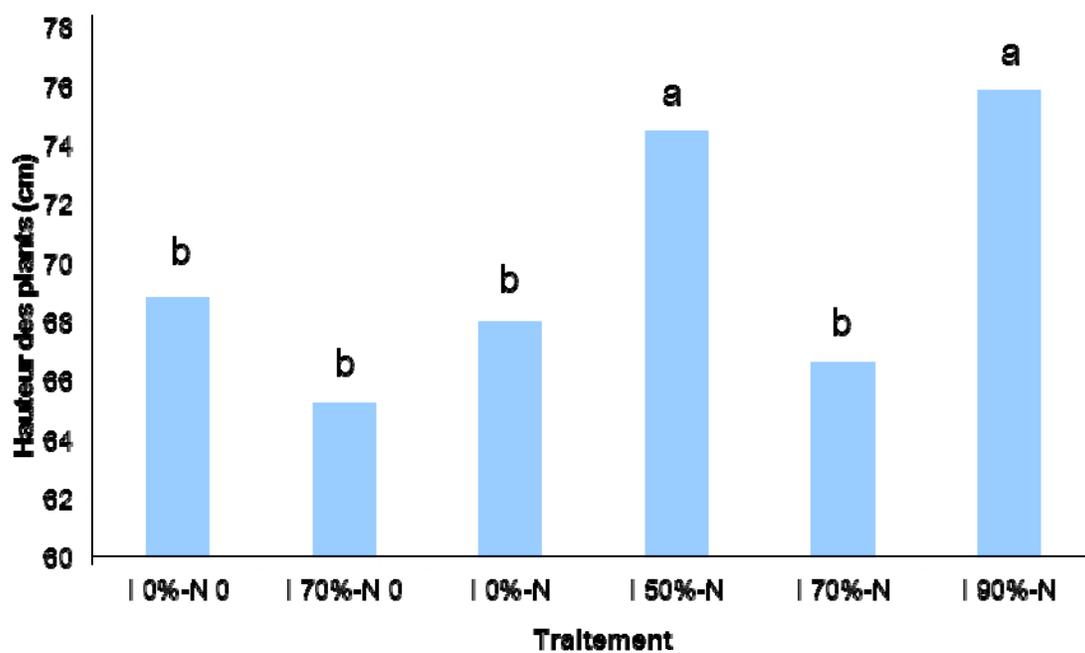


**Figure 9.** Évolution de la hauteur des plants (relatif) en 2010 selon le traitement (I, consigne de déclenchement de l'irrigation en pourcentage de la RU; N<sub>0</sub>, aucun apport azoté; N, apport azoté).

En ce qui a trait à la hauteur des plants, au 18 juin 2009, elle était uniforme (Figure 8). Cette situation était souhaitée puisqu'un soin particulier a été apporté afin que tous les plants reçoivent la même régie d'irrigation lors de l'année de transplantation, en 2008, de façon à s'assurer que les différences observées durant les années 2 et 3 soient bel et bien dues aux traitements. Par la suite, à partir du 16 juillet, les traitements témoins non fertilisés, A ( $I_{0\%}-N_0$ ) et B ( $I_{70\%}-N_0$ ), se dissocient rapidement du groupe et présentent des valeurs inférieures aux traitements fertilisés. De plus, cette différence s'accroît et perdure pour le reste de la saison. L'application de fertilisants azotés est donc déterminante dans le gain en hauteur. Toutefois, à partir du moment où les irrigations débutent pour le traitement B ( $I_{70\%}-N_0$ ) (2<sup>e</sup> moitié d'août), celui-ci semble répondre positivement aux apports en eau en accroissant son gain en hauteur pour finalement produire une hauteur finale plus élevée que le traitement A non irrigué ( $I_{0\%}-N_0$ ).

En fait, il est intéressant de noter que les diverses courbes (Figure 8) tendent à se distancer à partir du moment où les consignes d'irrigation des différents traitements ont toutes été atteintes, vers la mi-août. Ainsi, les différences observées selon la présence ou non d'irrigation à la fin de la 2<sup>e</sup> saison (2009) sont particulièrement intéressantes si l'on considère le peu de temps qu'elles ont eu pour s'établir. L'été 2009 a en effet bénéficié de bons apports de pluie qui ont retardé l'application de l'ensemble des irrigations. Malgré cela, la hauteur la plus grande tend à être atteinte par les plants les plus irrigués F ( $I_{90\%}-N$ ). Cette différence n'est cependant pas significative et l'ensemble des plants fertilisés, irrigués ou non, a produit une hauteur similaire. Cependant, à la fin de la saison 2010, beaucoup plus sèche, avec des épisodes d'irrigation débutant tôt et se maintenant tout au long de la saison, les plants fertilisés et irrigués présentaient une hauteur finale significativement supérieure ( $I_{50\%}-N$  à  $P = 0,05$  et  $I_{90\%}-N$  à  $P = 0,01$ ) au traitement C fertilisé mais non-irrigué ( $I_{0\%}-N$ ) (Figure 10). Si 2009 avait présenté des conditions climatiques similaires à celles de 2010, les différences entre les traitements irrigués auraient peut-être été encore plus marquées. De plus, considérant la longévité d'une bleuetière, on peut se demander si les différences ne seraient pas amplifiées avec les années.

Seuls les plants du traitement « intermédiaire » E ( $I_{70\%}-N$ ) ont eu une sous-performance au niveau du gain en hauteur, pour l'instant inexplicable dans le cadre de cette étude. Enfin, pour les traitements sans apport azoté, la tendance de 2009 ne s'est pas maintenue et il n'y a aucune différence significative ( $P = 0,17$ ) entre les traitements A ( $I_{0\%}-N_0$ ) et B ( $I_{70\%}-N_0$ ). La seule présence d'un meilleur apport en eau semble alors insuffisante pour occasionner une différence. Ce résultat, en accord avec ceux discutés précédemment sur le nombre d'épisodes d'irrigation, suggère à nouveau que l'impact positif de l'irrigation sur le gain en hauteur passe en partie par un impact bénéfique de la gestion de l'eau sur l'utilisation du N des engrais et renforce la nécessité de gérer ces deux aspects de la production de façon coordonnée.

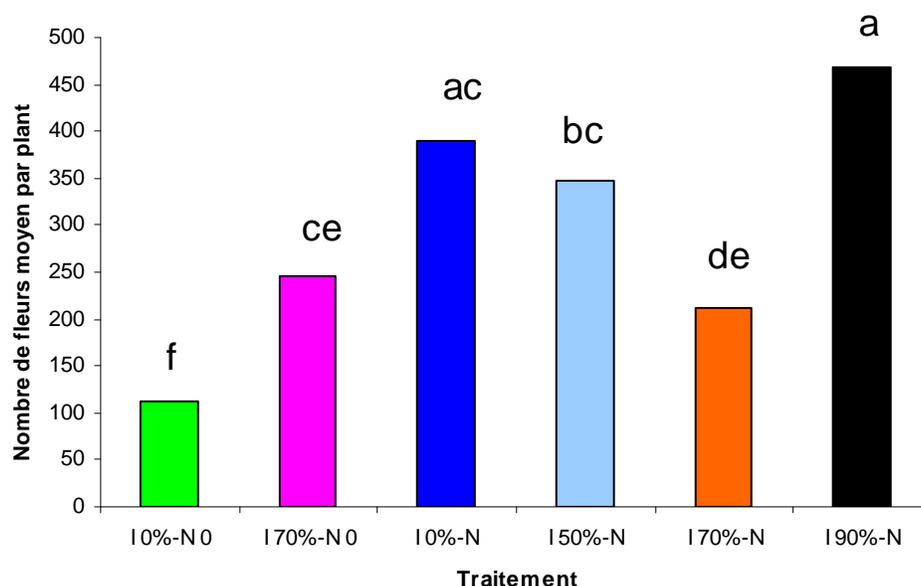


**Figure 10.** Hauteur des plants (cm) à l'automne 2010 (I, consigne de déclenchement de l'irrigation en pourcentage de la RU; N<sub>0</sub>, aucun apport azoté; N, apport azoté).

### 4.3 Impact des diverses consignes d'irrigation sur les indicateurs de productivité

#### 4.3.1 Nombre de fleurs produites selon le traitement

Étant donné que ce projet portait principalement sur l'implantation d'une bleuetière, les fleurs des premières années ont dû être pincées afin de lui assurer une bonne implantation. Peu de données relatives au rendement ont donc pu être générées. Toutefois, au printemps 2010, lors du pinçage, un décompte des fleurs a été effectué afin d'estimer un potentiel de rendement. L'analyse des résultats révèle (Figure 11), en premier lieu, que la gestion de l'irrigation a bel et bien eu un impact sur le potentiel de rendement. Ainsi, il en ressort qu'en l'absence de fertilisation N, l'irrigation a doublé le potentiel de rendement des plants. Ainsi, les plants irrigués non fertilisés (B,  $I_{70\%}-N_0$ ) ont produit près de 250 fleurs par plant, comparativement à un peu plus de 100 pour les plants non irrigués et non fertilisés (A,  $I_{0\%}-N_0$ ). De plus, bien que l'apport de N ait clairement bénéficié au potentiel de rendement des plants, il ressort que l'irrigation permet de réduire l'écart de potentiel de rendement de plants non fertilisés comparativement à des plants fertilisés mais non irrigués. Ainsi, bien que les plants du traitement C ( $I_{0\%}-N$ ) aient produit près de 400 fleurs chacun, comparativement à 250 pour les plants du traitement B ( $I_{70\%}-N_0$ ), statistiquement, la différence n'est pas significative à  $P = 0,05$ . Conséquemment, l'interprétation de l'impact de la fertilisation N est modulée par la gestion de l'irrigation. De même, la fertilisation a joué sur l'impact de l'irrigation. En effet, bien que les plants du traitement F ( $I_{90\%}-N$ ), les plus irrigués, tendent à avoir développé un meilleur potentiel de rendement, à l'instar de leur gain en hauteur, comparativement aux plants fertilisés mais non irrigués C ( $I_{0\%}-N$ ), statistiquement leur potentiel de rendement est similaire. Toutefois, il faut considérer le jeune âge de la bleuetière, couplé au fait que les bourgeons floraux du bleuetier se forment durant la saison qui précède leur floraison. Ainsi, le nombre de fleurs comptées au printemps 2010 est issu des bourgeons qui se sont formés durant la régie d'irrigation de 2009 où peu d'épisodes d'irrigation ont été réalisés. En considérant ces faits, de même que l'impact important qu'a eu l'irrigation dans le cas du traitement B ( $I_{70\%}-N_0$ ) dans l'atténuation du déficit en fleurs dû à l'absence de fertilisation N, il est raisonnable de penser qu'un impact cumulatif plus important pourrait se créer avec le temps au cours des années de production intensive, particulièrement si les conditions hydriques naturelles sont source de stress pour la culture.



**Figure 11.** Nombre moyen de fleurs par plant au printemps 2010 (I, consigne de déclenchement de l'irrigation en pourcentage de la RU; N<sub>0</sub>, aucun apport azoté; N, apport azoté).

#### 4.3.2 Efficacité d'utilisation de l'eau

Le volume d'eau appliqué par l'irrigation selon le traitement est présenté au tableau suivant. En général, les volumes sont comparables les deux années, hormis pour le traitement F. En ce qui a trait au volume total, ces derniers doublent pratiquement d'une consigne à une autre (D vs E et E vs F). Aussi, afin d'évaluer l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation, le gain en hauteur des plants depuis leur plantation est également présenté au tableau suivant.

**Tableau 4.** Volume d'eau d'irrigation appliqué selon la saison et le gain en hauteur des bleuétiers et le nombre de fleurs produites selon le traitement.

Traitements <sup>†</sup>	Volume d'eau appliqué (l)			Hauteur finale – initiale des plants (cm)	Fleurs (nombre) 2010
	2009	2010	Total		
I 70% - N <sub>0</sub> (B)	171	216	387	27,3	246
I 50% - N (D)	306	153	459	38,8	348
I 70% - N (E)	324	396	720	31,1	213
I 90% - N (F)	554	957	1510	38,9	469

<sup>†</sup> I = consigne de déclenchement de l'irrigation en pourcentage de la RU; N = absence ou présence de fertilisation azotée.

Maintenant, il est possible d'évaluer l'efficacité d'utilisation de l'eau selon le gain en hauteur des bleuetiers et le nombre de fleurs produites. En terme de gain en hauteur, l'eau appliquée dans le traitement D est trois fois plus efficace que celle appliquée dans le traitement F, pour un gain en hauteur semblable (Tableau 4) et une hauteur finale non significativement différente (Figure 10). En ce qui a trait au nombre de fleurs produites, le calcul d'efficacité s'est basé selon le nombre de litres d'eau appliqué en 2009 puisque les fleurs comptées en 2010 sont issues des bourgeons floraux produits la saison précédente. Sur cette base, le nombre de litres d'eau appliqués par fleur produite est respectivement de 0,7 – 0,9 – 1,5 et 1,2 litre pour les traitements B, D, E et F (Tableau 5). Ainsi, l'efficacité du traitement B semble la plus élevée. Toutefois, cette donnée doit être considérée en gardant en tête que ces plants ont par ailleurs démontré une productivité en termes de nombre de fleurs produites beaucoup plus basse que celles des autres traitements irrigués (Tableau 4). Ainsi, parmi les autres traitements irrigués recevant des apports en N, l'efficacité la plus élevée a été observée pour le traitement D. La valeur de 0,9 diffère cependant peu des autres traitements. De plus, d'un point de vu de production, il demeure tout de même que les plants du traitement F ont significativement produit 35% plus de fleurs que ceux du traitement D.

**Tableau 5.** Litres d'eau appliqués par l'irrigation selon le gain en hauteur des plants et le nombre de fleurs produites.

<b>Traitements<sup>†</sup></b>	<b>Litres d'eau appliqués par cm de gain en hauteur des plants (nombre)</b>	<b>Litres d'eau appliqués en 2009 par unité de fleurs comptées en 2010 (nombre)</b>
I 70% - N <sub>0</sub> (B)	14,2	0,7
I 50% - N (D)	11,8	0,9
I 70% - N (E)	23,2	1,5
I 90% - N (F)	38,8	1,2

<sup>†</sup> I = consigne de déclenchement de l'irrigation en pourcentage de la RU; N = absence ou présence de fertilisation azotée.

#### **4.4 Incidence des maladies racinaires du bleuet en corymbe causées par *Phytophthora* et *Pythium* selon les régimes hydriques**

Aucun dépérissement de plant n'a pu être relié à des maladies racinaires qui auraient été causées par *Phytophthora* et *Pythium*. Au printemps 2009, une trentaine de bleuetiers avaient subi des dommages attribuables aux campagnols et ces plants ont été exclus des essais. Au printemps 2010, sept bleuetiers avaient subi des dommages probablement attribuables à l'hiver, mais ce dépérissement, en plus d'être très faible, ne peut pas être relié aux différentes consignes d'irrigation.

#### **4.5 Flux *in situ* des ions $\text{NH}_4^+$ et $\text{NO}_3^-$ et contenu en $\text{N}_{\text{tot}}$ du sol selon la fertilisation azotée et les diverses consignes d'irrigation**

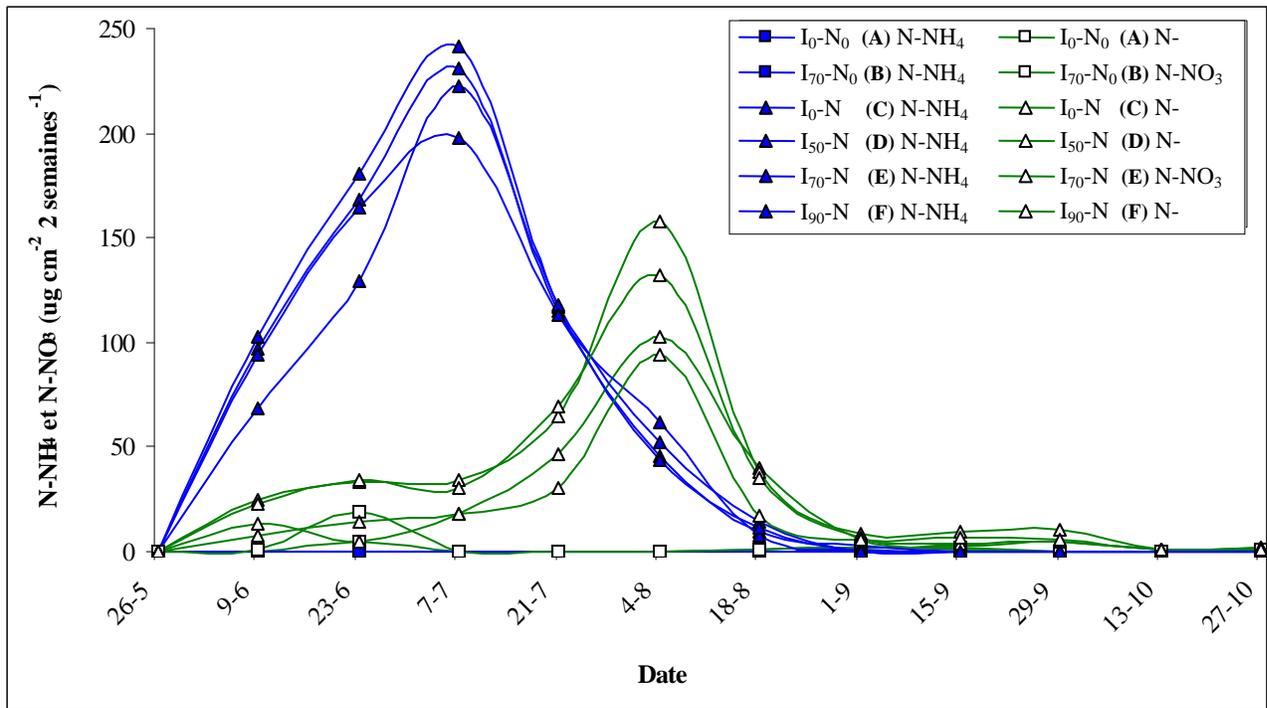
##### 4.5.1 Membranes d'échange ionique

Pour étudier l'impact de l'irrigation sur la dynamique de l'azote, il était primordial d'utiliser une méthode qui tenait compte des conditions hydriques du sol puisque la base de comparaison majeure du projet est une variation de l'apport en eau aux parcelles. Les membranes d'échange ionique (MEI), insérées près du plant dans la zone explorée par les racines, sont reconnues comme étant sensibles aux conditions hydriques. Elles fonctionnent selon un principe d'échange d'ions. Elles sont d'abord pré-saturées avec des ions pour lesquels elles n'ont qu'une faible affinité (contre-ions). Lorsqu'elles sont insérées dans le sol et mises en contact avec les ions pour lesquels elles ont une très grande affinité, même à très basse concentration (ex.  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), les MEI libèrent leurs contre-ions et les remplacent par les ions ciblés. Les ions ciblés dans l'étude restent ainsi fixés jusqu'à ce qu'ils soient récupérés au laboratoire. Les MEI sont donc très adéquates pour étudier les traitements dont les effets peuvent jouer sur les apports en nutriments aux plants car il est accepté que les MEI simulent l'activité des racines, en ce sens qu'elles retirent les nutriments de la solution du sol pour les conserver. En fait, tout ce qui modifiera l'acheminement des nutriments vers les racines le fera de façon similaire pour les MEI car les apports de nutriments aux MEI et aux plants sont régulés par les mêmes propriétés édaphiques et climatiques.

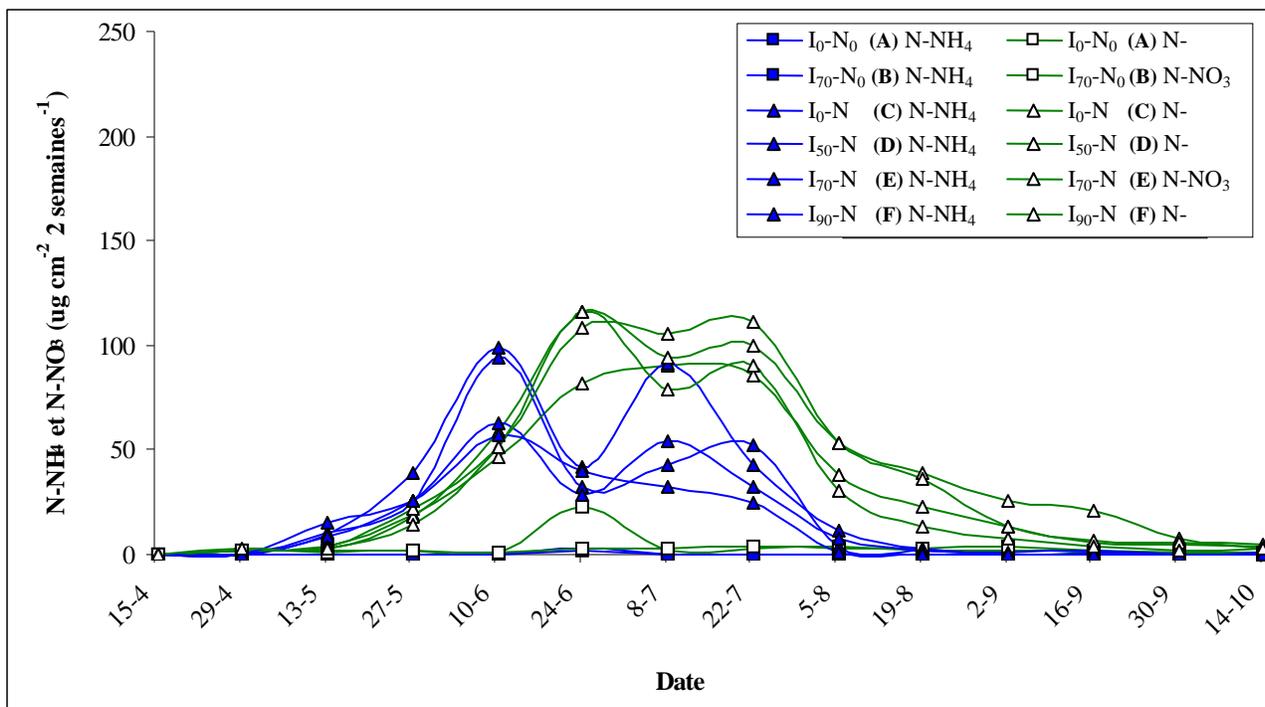
Un premier constat s'impose lorsqu'on consulte les figures 12 et 13, illustrant l'ensemble des flux de N- $\text{NO}_3$  et de N- $\text{NH}_4$  tout au long des saisons 2009 et 2010. Sur ces graphiques, l'ensemble des lignes des différents traitements a volontairement été tracé de la même couleur pour les flux de N- $\text{NO}_3$  et de N- $\text{NH}_4$ , afin d'attirer l'attention sur l'évolution globale des flux dans la saison. Ainsi, il en ressort que la teneur en azote de la solution du sol est très variable dans le temps. Les flux de N ne sont pas réguliers, ni au cours d'une même saison, ni d'une saison à l'autre. Par exemple, en 2009, les flux varient de 0,01 à 242  $\mu\text{g cm}^{-2} 2 \text{ semaines}^{-1}$  et de 0,06 à 158  $\mu\text{g cm}^{-2} 2 \text{ semaines}^{-1}$  pour les ions N- $\text{NH}_4$  et N- $\text{NO}_3$ , respectivement. En 2010, ils varient de 0,04 à 99  $\mu\text{g cm}^{-2} 2 \text{ semaines}^{-1}$  et de 1,09 à 116  $\mu\text{g cm}^{-2} 2 \text{ semaines}^{-1}$  pour les ions N- $\text{NH}_4$  et N- $\text{NO}_3$ , respectivement. Et si l'on compare les valeurs maximales atteintes en 2009 et 2010, celles de 2010 sont 2,4 fois moindres pour les ions N- $\text{NH}_4$  et 1,4 fois plus faibles pour les N- $\text{NO}_3$ , respectivement.

Dans un second temps, les tracés des figures 12 et 13 révèlent l'importance des flux de N-NO<sub>3</sub>, malgré le fait que les apports de N aient été faits avec du sulfate d'ammoniaque (21-0-0) apportant le N uniquement sous forme de N-NH<sub>4</sub>. En effet, bien qu'en 2009 les flux de N-NH<sub>4</sub> aient atteint des valeurs plus élevées (maximum de 242 µg cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup>) que celles de N-NO<sub>3</sub> (maximum de 158 µg cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup>), ils se présentent en un seul pic, tôt en saison, et s'abaissent rapidement suivant la fin des apports d'engrais. En 2010, les flux de N-NH<sub>4</sub> se concentrent aussi principalement en début de saison, moment des apports d'engrais. De plus, les valeurs maximales atteintes (maximum de 99 µg cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup>) sont sous celles de N-NO<sub>3</sub> (maximum de 112 µg cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup>). Il semble donc que rapidement les ions NH<sub>4</sub> se soient nitrifiés en ions NO<sub>3</sub> et que ces derniers aient joué un rôle plus important que prévu dans la nutrition des plants. Ceci va à l'opposé de ce qui est véhiculé habituellement. Il est vrai cependant que la bleuëtière ne compte que trois années et que le pH du sol n'a pas encore atteint des valeurs aussi acides que ce que l'on pourrait retrouver dans une bleuëtière établie depuis plus longtemps. Toutefois, les conditions sont représentatives des années d'implantation, sujet de l'étude. Conséquemment, durant ces premières années, si l'on considère la rapidité avec laquelle les flux de N-NH<sub>4</sub> redescendent vers zéro, il ressort que même dans les cas où les irrigations débuteraient tôt en saison comme en 2010, la régie d'irrigation jouera principalement sur la disponibilité des ions nitrates. Par exemple, en 2010, entre le 22 juillet et le 2 septembre, période comprenant de 50 à 82 % de toutes les irrigations pratiquées selon les traitements, les flux de N-NO<sub>3</sub> des parcelles fertilisées sont de 2 à 315 fois plus élevés que ceux de N-NH<sub>4</sub>.

L'importance plus grande que prévue des ions nitrates constitue un point majeur puisque les ions NH<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> ont des comportements tout à fait différents dans le sol en regard des conditions hydriques. En effet, les ions NO<sub>3</sub> ne se fixent pas sur les composantes du sol et peuvent être lessivés, contrairement aux ions NH<sub>4</sub> qui ont la capacité de se fixer sur la CEC du sol. Dans les faits, les ions NO<sub>3</sub> se déplacent avec le mouvement de l'eau ou « mass flow », ce qui n'est pas le cas des ions NH<sub>4</sub>. Puisque l'irrigation est utilisée spécifiquement pour modifier la disponibilité et donc le mouvement de masse de l'eau, ceci signifie que l'irrigation pourrait avoir plus de conséquences que supposé *a priori* sur l'approvisionnement en N des plants de bleuets et sur le risque de perte de N dans l'environnement par le lessivage des nitrates sous ces conditions. De plus, le coût énergétique d'utilisation des NO<sub>3</sub> par les plants n'est pas le même que pour les ions NH<sub>4</sub>. En effet, bien qu'il soit généralement accepté que les plants de bleuets peuvent absorber le N sous forme de NH<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub>, le NO<sub>3</sub> a un coût énergétique plus grand. De plus, à concentrations égales, le bleuëtière absorbera plus rapidement le NH<sub>4</sub>. Ainsi, dès que les pics post-fertilisation de NH<sub>4</sub> se résorbent, la régie d'irrigation joue sur la forme d'azote la moins intéressante au niveau énergétique pour les plants.



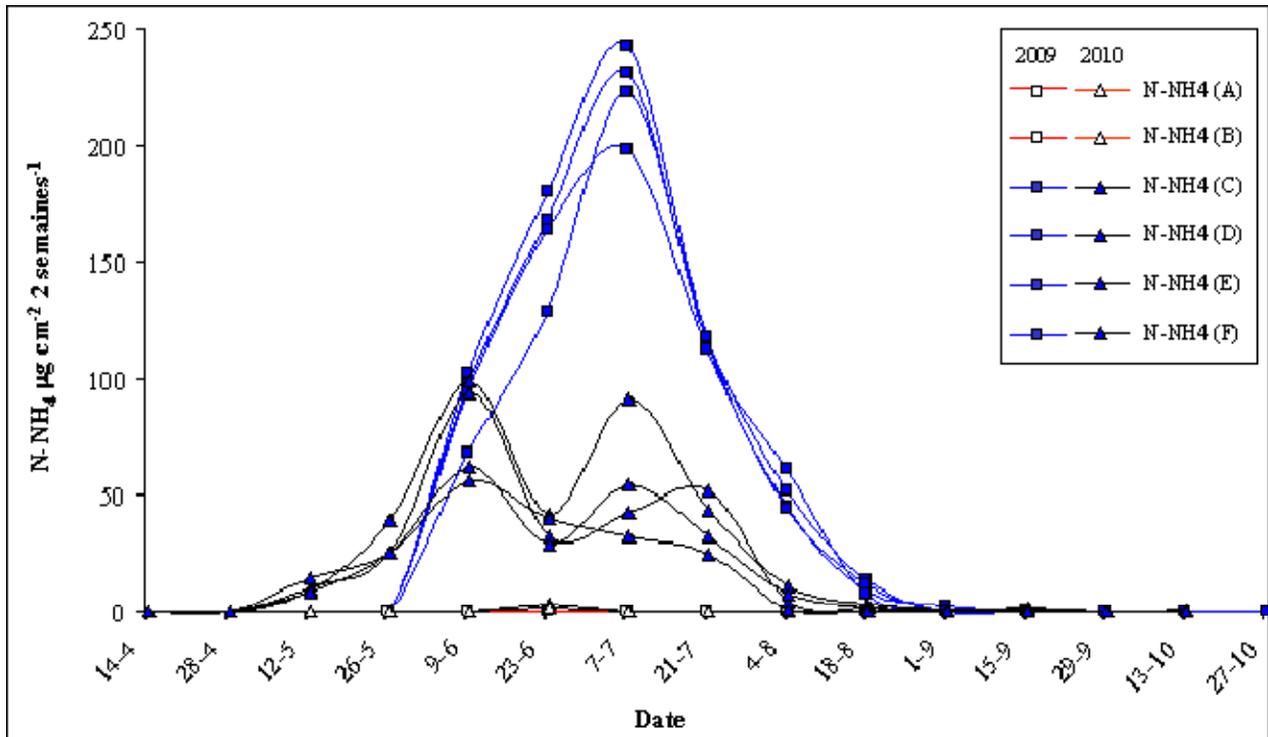
**Figure 12.** Flux de  $N-NH_4$  et de  $N-NO_3$  au cours de la saison 2009 pour l'ensemble des traitements indifféremment de la régie d'irrigation ou de la fertilisation azotée.



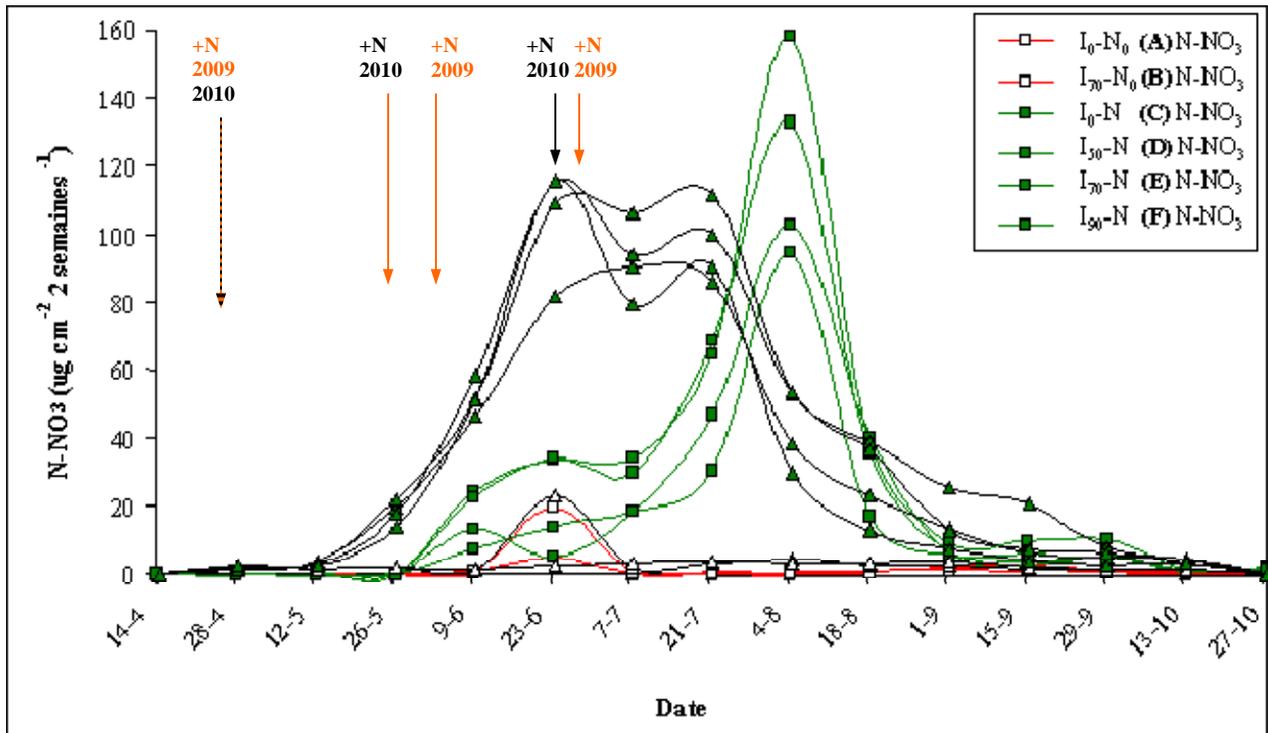
**Figure 13.** Flux de  $N-NH_4$  et de  $N-NO_3$  au cours de la saison 2010 pour l'ensemble des traitements indifféremment de la régie d'irrigation ou de la fertilisation azotée.

Troisièmement, la fertilisation a fait une grande différence sur la disponibilité non seulement des N-NH<sub>4</sub>, mais aussi des N-NO<sub>3</sub>, renforçant l'hypothèse que ces derniers découlent de la nitrification des ions NH<sub>4</sub> provenant de l'engrais (Figure 14 et Figure 15). Pour les ions N-NH<sub>4</sub>, l'impact de la fertilisation allait de soi puisque le 21-0-0 est constitué de sulfates d'ammoniaque. Les fortes valeurs de N-NH<sub>4</sub> suivent d'ailleurs toujours de près les périodes où l'engrais est apporté (Figure 14 et Figure 15). Ainsi, si l'on considère comme régime témoin le traitement C, fertilisé en N mais non irrigué (I<sub>0%</sub>-N), on constate en 2009 que les premiers apports de N (29 avril et 4 juin), totalisant 15 kg N ha<sup>-1</sup>, font passer les flux de près de 0 à 102 µg N-NH<sub>4</sub> cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup>. Par la suite, l'apport de 10 kg N ha<sup>-1</sup> du 2 juillet produit une hausse similaire et la quantité de N-NH<sub>4</sub> adsorbé double, pour atteindre 242 µg N-NH<sub>4</sub> cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup>. Aucun autre apport d'engrais N n'étant réalisé suivant cette période, les quantités de N-NH<sub>4</sub> régressent rapidement, dès le 8 juillet, pour stagner sous les 10 µg cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup> en août et septembre. En 2010, les flux de N-NH<sub>4</sub> réagissent de la même façon. Les premiers apports de N (29 avril et 4 juin) totalisant 20 kg N ha<sup>-1</sup> font rapidement passer les flux de 0,15 à 94 µg N-NH<sub>4</sub> cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup>. Le 3<sup>e</sup> apport (25 juin) fait lui aussi remonter les flux de 32 à 43 µg N-NH<sub>4</sub> cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup>. Puis ceux-ci s'abaissent rapidement et demeurent sous les 10 µg cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup> en août et septembre.

Du côté des nitrates, les tracés suivent ceux de N-NH<sub>4</sub>, mais leurs sont légèrement décalés dans le temps. Ce décalage s'explique du fait que les ions ammonium doivent être nitrifiés et seront captés par les membranes anioniques seulement une fois transformés en nitrates. Cette étape faisant intervenir des microorganismes du sol (bactéries nitrifiantes), il est logique que les flux de nitrates soient décalés dans le temps, ainsi que plus variables, puisque les conditions affectant l'activité bactérienne du sol affecteront aussi le taux de génération de N-NO<sub>3</sub> (Figure 16). Toutefois, il semble que le sol ait aussi été en mesure de fournir une certaine quantité de N-NO<sub>3</sub>, mais pas de N-NH<sub>4</sub>. En effet, les MEI placées dans les parcelles non fertilisées (A et B) ont sorbé tout au long de la saison des concentrations en N-NH<sub>4</sub> de près de zéro. La capacité du sol de la bleuetière à fournir des N-NH<sub>4</sub> semble donc limitée. Par contre, dans ces mêmes parcelles, certaines quantités de N-NO<sub>3</sub> (2009 : 19 µg cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup>, 2010 : 23 µg cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup>) ont été captées. Malgré l'abaissement du pH du sol, celui-ci semble donc pouvoir fournir une certaine quantité de N-NO<sub>3</sub> équivalent à 12 et 20 % du maximum mesuré dans les parcelles fertilisées en 2009 et 2010, respectivement. Toutefois, tel que mentionné précédemment, ces données doivent être considérées en tenant compte du fait que le pH du sol n'a pas encore atteint des valeurs aussi acides que ce que l'on pourrait retrouver dans une bleuetière établie depuis plus longtemps.



**Figure 14.** Flux de N-NH<sub>4</sub> au cours des saisons 2009 et 2010 des traitements non fertilisés (en rouge) et fertilisés (en bleu) indifféremment de la régie d'irrigation (+ N = apport d'engrais N).



**Figure 15.** Flux de N-NO<sub>3</sub> au cours des saisons 2009 et 2010 des traitements non fertilisés (en rouge) et fertilisés (en vert) indifféremment de la régie d'irrigation (+ N = apport d'engrais N).

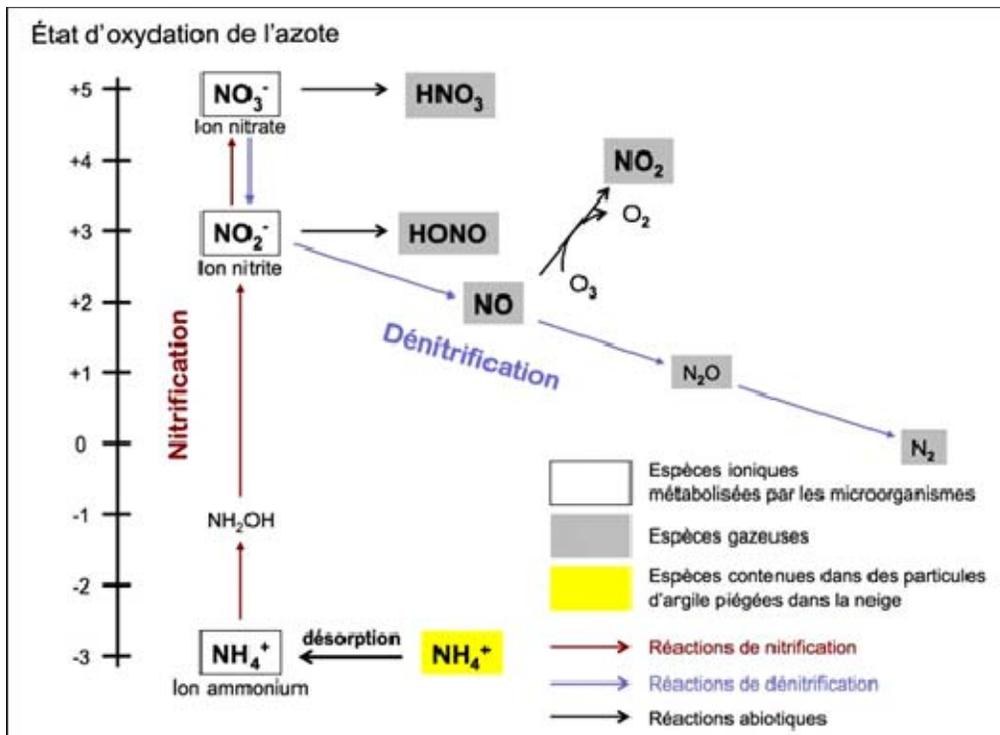


Figure 16. Cycle de transformation de l'azote.

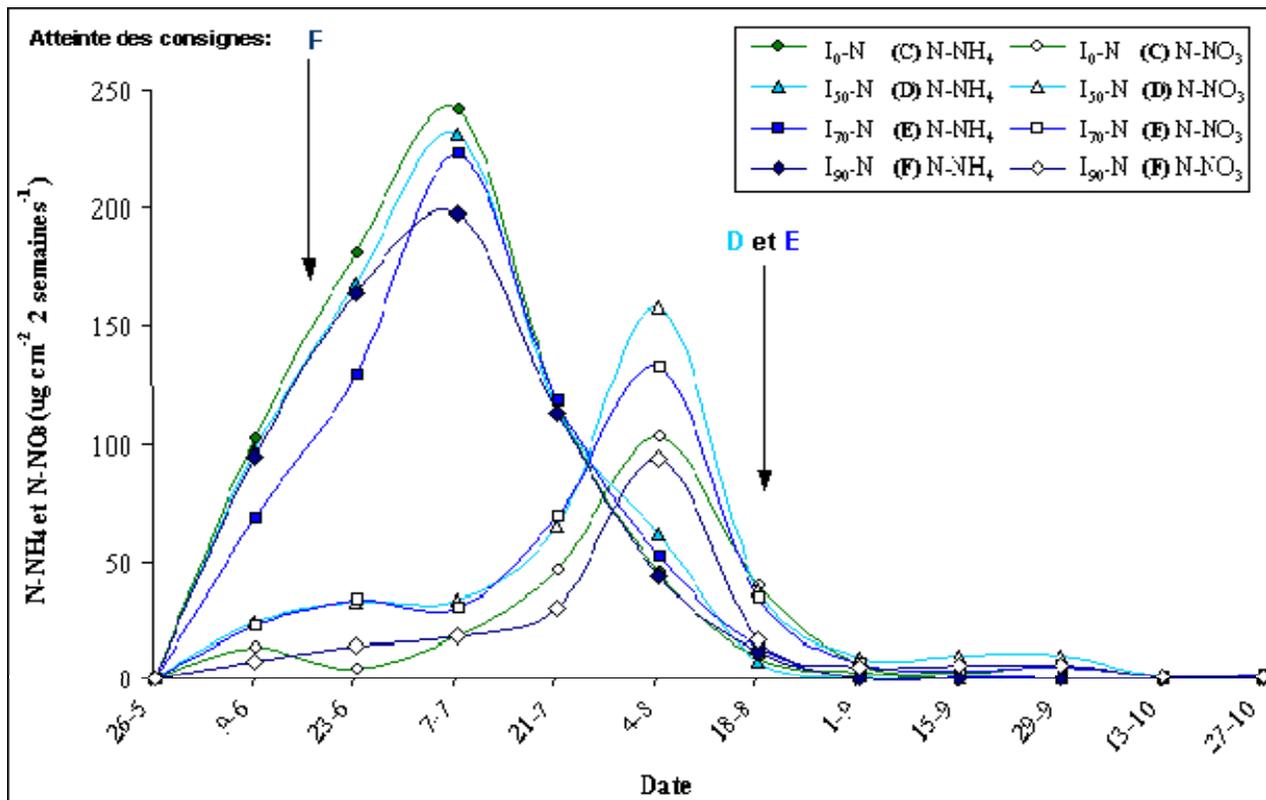
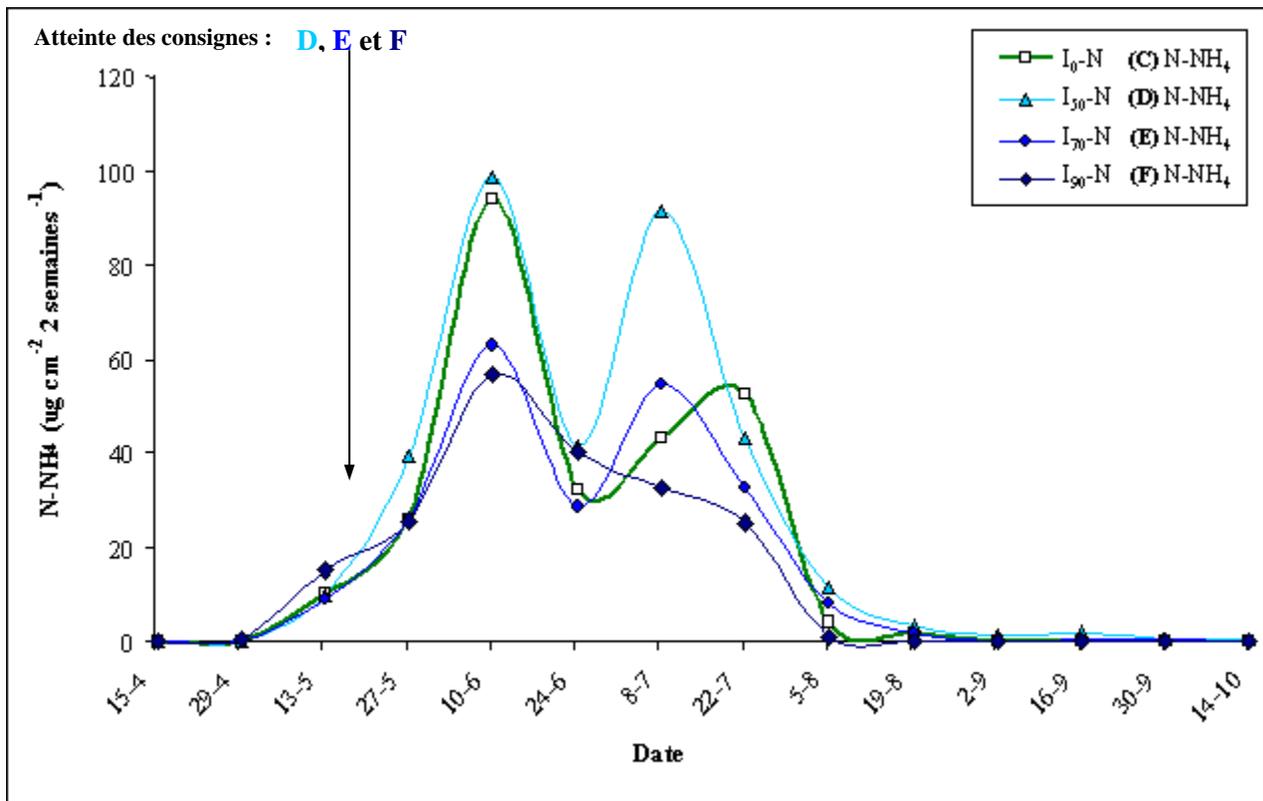


Figure 17. Flux de  $\text{N-NH}_4$  et de  $\text{N-NO}_3$  des parcelles fertilisées au cours de la saison 2009 en fonction de la consigne d'irrigation.

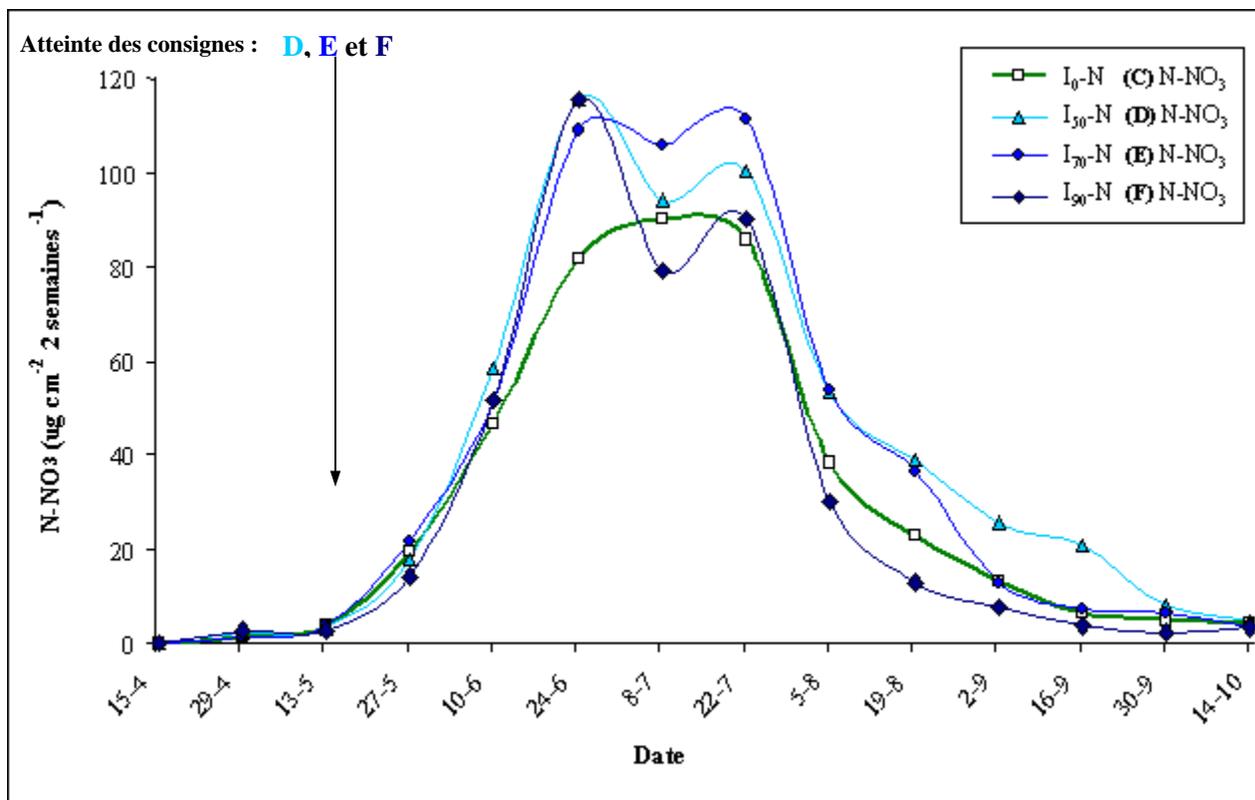
En quatrième lieu, l'irrigation a eu un impact moindre que la fertilisation sur les flux de N disponible en solution du sol. Ceci est particulièrement vrai pour la saison 2009 qui n'a pas connu de période de déficit hydrique prononcé. En fait, seul le traitement F, ayant la consigne la moins sévère (irrigation à 90 % de la RU), a été appliqué sur une période significative de l'essai (Figure 17). Malgré cela, aucune tendance claire ne se dessine, ni pour les flux de N-NH<sub>4</sub>, ni pour ceux de N-NO<sub>3</sub>. L'année 2010, beaucoup plus sèche et chaude, a davantage été propice à l'étude de l'impact de l'irrigation. Les flux de N-NH<sub>4</sub> et de N-NO<sub>3</sub> des parcelles fertilisées sont rapportés séparément à la Figure 18 et à la Figure 19 dont l'échelle a été modifiée (valeur maximale de 140 µg cm<sup>-2</sup> 2 semaines<sup>-1</sup>) afin de faciliter la comparaison des courbes. Tout d'abord, les flux de N-NH<sub>4</sub> ont été moins influencés par l'irrigation que ceux de N-NO<sub>3</sub>. Il y a toutefois une différence significative qui se maintient entre le traitement non irrigué C (I<sub>0%</sub>-N) et le plus irrigué F (I<sub>90%</sub>-N<sub>0</sub>) durant les semaines du 22 juillet au 19 août. Cet intervalle de temps se situe dans une période d'irrigation intense contenant 61 % de toutes les irrigations du traitement F (I<sub>90%</sub>-N<sub>0</sub>). Ainsi, les flux de N-NH<sub>4</sub> sont moindres dans les parcelles irriguées F (I<sub>90%</sub>-N) où ils ne représentent que 48, 21 et 12 % de ceux mesurés dans les parcelles non irriguées C (I<sub>0%</sub>-N) au cours de ces trois périodes.

Il est alors permis de se demander si l'apport d'eau n'a pas influencé la transformation du NH<sub>4</sub> en NO<sub>3</sub>. L'effet de l'eau pourrait être direct, en jouant sur la dissolution de l'engrais. Par exemple, en 2010, avec des apports en eau par l'irrigation plus fréquents, le N-NH<sub>4</sub> des engrais semble s'être nitrifié beaucoup plus intensément en N-NO<sub>3</sub> comme l'illustrent les pics de N-NH<sub>4</sub> et de N-NO<sub>3</sub> qui se chevauchent très rapidement comparativement à 2009 où une période de quatre semaines sépare les pics. L'effet pourrait aussi être indirect dans l'éventualité où la meilleure croissance des plants F (I<sub>90%</sub>-N) aurait créé une plus grande demande sur les ions azotés, déplaçant l'équilibre vers la création de nitrates (Figure 16). Cette dernière hypothèse est supportée par les résultats obtenus pour les flux des nitrates présentés à la Figure 19. En effet, les flux de N-NO<sub>3</sub> des parcelles F (I<sub>90%</sub>-N) durant cette période sont généralement plus faibles que ceux des parcelles C (I<sub>0%</sub>-N), D (I<sub>50%</sub>-N) et E (I<sub>70%</sub>-N). La différence n'est cependant pas toujours significative à  $P = 0,05$ , mais elle démontre une tendance intéressante. Si la croissance des plants F (I<sub>90%</sub>-N) avait été une des moins grandes, les flux plus faibles de N-NO<sub>3</sub> des parcelles F (I<sub>90%</sub>-N) auraient pu signifier que les nitrates ont été davantage lessivés. Cependant, puisque leur développement est le meilleur et que l'irrigation est gérée de façon raisonnée, i.e. qu'elle tient compte de la capacité réelle de rétention en eau du sol afin d'éviter le transport de surplus d'eau au travers du profil, les résultats suggèrent plutôt que les ions nitrates ont été prélevés plus activement par les plants créant une compétition plus forte entre les racines et les MEI pour les nitrates.

Enfin, quels que soient les traitements, la concentration globale en azote de la solution du sol diminue graduellement dès la mi-août et peu d'ions azotés se retrouvent sorbés sur les MEI en septembre et octobre des deux années. Il semble donc demeurer peu de nitrates résiduels en solution du sol à la fin d'octobre. Ceci est une bonne chose considérant les liens étroits existant entre les quantités résiduelles de nitrates présentes à l'automne et les risques de pollution diffuse.



**Figure 18.** Flux de N-NH<sub>4</sub> des parcelles fertilisées au cours de la saison 2010 en fonction de la consigne d'irrigation.



**Figure 19.** Flux de N-NO<sub>3</sub> des parcelles fertilisées au cours de la saison 2010 en fonction de la consigne d'irrigation.

#### 4.5.2 Contenu en N du sol

Afin d'appuyer les mesures effectuées avec les MEI, des analyses chimiques de sol ont aussi été réalisées. Toutefois, les analyses statistiques révèlent qu'il n'y a aucune différence significative selon les traitements pour les teneurs en N<sub>tot</sub>, en N-NH<sub>4</sub> (KCl), de même qu'en phosphore (P), potassium (K) calcium (Ca) et magnésium (Mg) Mehlich-3 ou le bore (B) à l'eau chaude, quelle que soit l'année ou le temps d'échantillonnage dans la saison. À titre indicatif, les teneurs moyennes de ces éléments sont toutefois présentées au Tableau 6. Le court délai de deux ans durant lequel les traitements ont été appliqués peut expliquer cette absence de différence. Les éléments totaux et, dans une certaine mesure, les éléments disponibles Mehlich-3, prennent en effet un certain nombre d'années avant de montrer des changements significatifs.

Dans le cas du N-NH<sub>4</sub>, très labile, une différence était cependant attendue, ce qui n'a pas été le cas. La modification rapide de ces ions en ions N-NO<sub>3</sub>, tel que suggéré par les données obtenues des MEI, pourrait expliquer cette absence de différence. En effet, toujours selon les résultats des MEI, cette transformation ne prenait que de 2 à 3 semaines à se produire. C'est environ le délai qui sépare la dernière fertilisation (2009 : 2 juillet 2010 : 25 juin) et l'échantillonnage de juillet (2009 : 22 juillet 2010 : 23 juillet). Pour les échantillonnages des mois d'août et septembre, les délais étaient encore plus longs. D'ailleurs, les teneurs en N-NO<sub>3</sub> des mêmes extraits (KCl) présentent effectivement, quant à eux, des écarts significatifs à chacune des années selon la

fertilisation. Ceci renforce l'hypothèse d'une conversion rapide de l'engrais ammoniacal en nitrates puisque l'engrais apporte uniquement de l'ammonium, mais que ces ions ne présentent pas de différence selon la fertilisation, contrairement aux ions nitrates sur lesquels le traitement de fertilisation a un impact. En 2009, les différences se concentrent durant la période du 22 juillet, 20 jours suivant la dernière application d'engrais (Figure 20). Les sols des parcelles A ( $I_{0\%}-N_0$ ) ( $P < 0,010$ ) et B ( $I_{70\%}-N_0$ ) ( $P < 0,010$ , sauf pour F ( $I_{90\%}-N$ ) où  $P = 0,06$ ) ont des teneurs en  $N-NO_3$  qui ne représentent que 20 % de celles des parcelles fertilisées, en moyenne. En 2010, l'impact de la fertilisation est similaire et au 23 juillet, les parcelles A ( $I_{0\%}-N_0$ ) ( $P < 0,001$ ) et B ( $I_{70\%}-N_0$ ) ( $P < 0,001$ ) présentent des teneurs en  $N-NO_3$  qui n'égalent que 21 % de celles retrouvées dans les parcelles fertilisées (Figure 21). De plus, les différences perdurent dans le temps et au 15 septembre, les concentrations en nitrates des parcelles A ( $I_{0\%}-N_0$ ) et B ( $I_{70\%}-N_0$ ) ne valent que 15 % de celles des parcelles fertilisées.

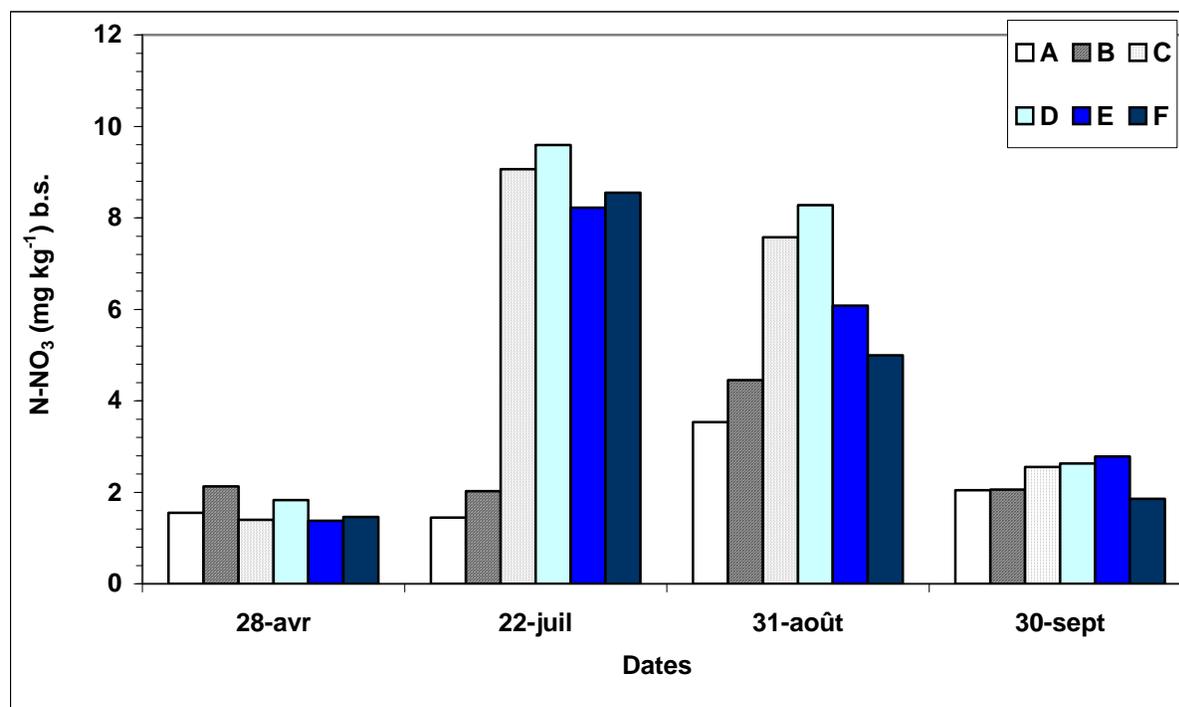
Par ailleurs, tant en cours de saison qu'en automne, l'irrigation semble avoir joué sur la teneur en nitrates du sol. Déjà en 2009, le sol des parcelles les plus irriguées F tendait à avoir une teneur moindre en nitrates que le sol des parcelles moins ou pas irriguées. En 2010, les différences s'accroissent en cours de saison et au 15 septembre, les teneurs en  $N-NO_3$  du traitement F ( $I_{90\%}-N$ ) ne valent que 62, 66 et 76 % de celles des traitements C, D et E, ( $I_{50\%}$ ,  $70\%$ , et  $90\%-N$ ) respectivement ( $P = 0,07 - 0,10$ ). Les analyses de sol de la couche 0-20 cm sur le rang viennent ainsi corroborer les plus faibles teneurs en nitrates mesurées avec les MEI dans la couche de sol explorée par les racines dans les parcelles F, les plus irriguées ( $I_{90\%}-N$ ). Tel qu'énoncé précédemment, ceci suggère un prélèvement plus intense des ions nitrates puisque les gains en hauteur et le potentiel de rendement y sont les meilleurs. Mais surtout, ces résultats suggèrent qu'en présence d'une irrigation bien gérée, la stabilisation de la teneur en eau du sol à un certain niveau de disponibilité a favorisé l'utilisation du N des engrais par les plants de bleuets. Enfin, ces résultats démontrent que l'utilisation d'un outil de mesure *in situ*, sensible aux microvariations des éléments en solution du sol, et influencés par les conditions hydriques de celui-ci, est un excellent choix de suivi.

**Tableau 6.** Contenu en azote total et éléments majeurs et mineurs disponibles dans la strate 0-20 cm de sol en 2009 et 2010<sup>†</sup>.

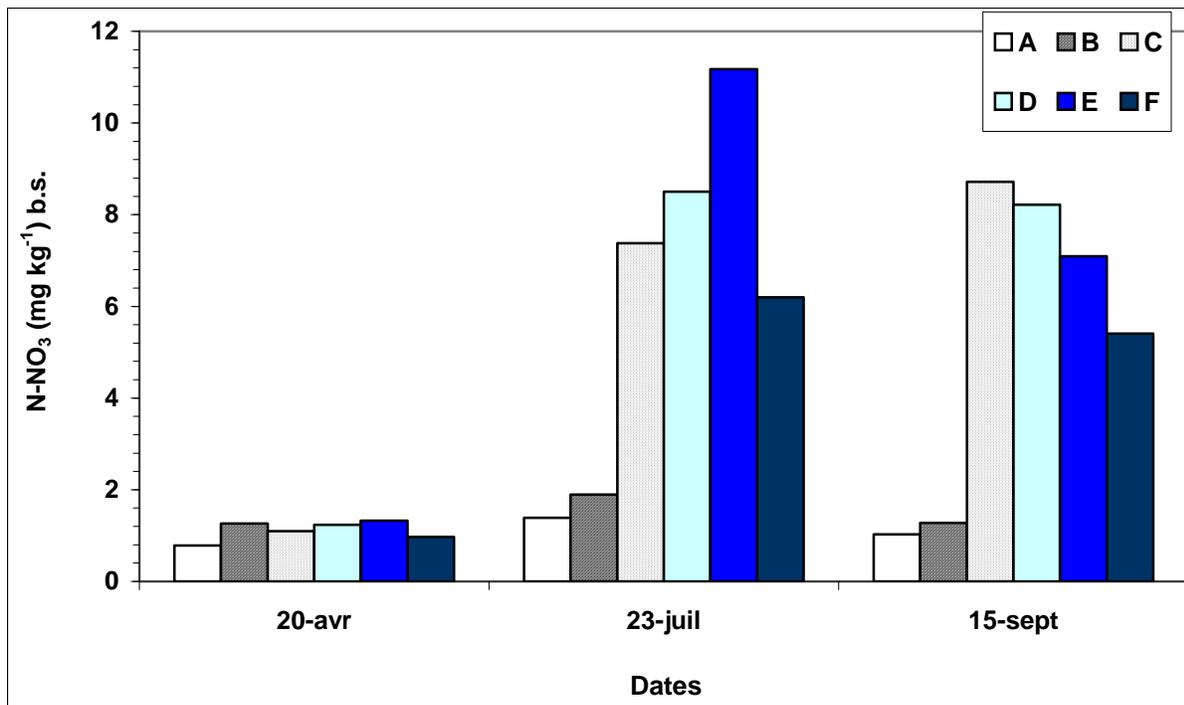
Éléments	Concentrations						
	2009				2010		
	28 avril <sup>‡</sup>	22 juillet	31 août	30 sept.	20 avril	23 juillet	15 sept.
N <sub>tot</sub> (mg kg <sup>-1</sup> b.s.)	1130			1 033	1 212		1 118
N-NH <sub>4</sub> (KCl) mg kg <sup>-1</sup> b.s.)	2,16	11,06	0,52	0,07	0,58	1,76	6,94
Éléments Mehlich-3 (mg kg <sup>-1</sup> b.s.)							
P	320	297	321	333	333	312	323
K	88	115	123	128	136	127	84
Ca	578	540	518	545	548	510	487
Mg	42	51	53	55	61	61	44
pH	5,41	5,09	5,25	5,50	5,52	5,19	4,78
MO (%)	3,17				3,54		

<sup>†</sup> Puisqu'il n'existe aucune différence selon les traitements, les valeurs moyennes de l'ensemble des parcelles sont présentées.

<sup>‡</sup> Les échantillonnages d'avril des deux années ont été réalisés avant la première fertilisation afin de caractériser le site à chacune des années.



**Figure 20.** Contenu en N-NO<sub>3</sub> (KCl) de la strate 0-20 cm de sol selon la fertilisation et les consignes d'irrigation en 2009.

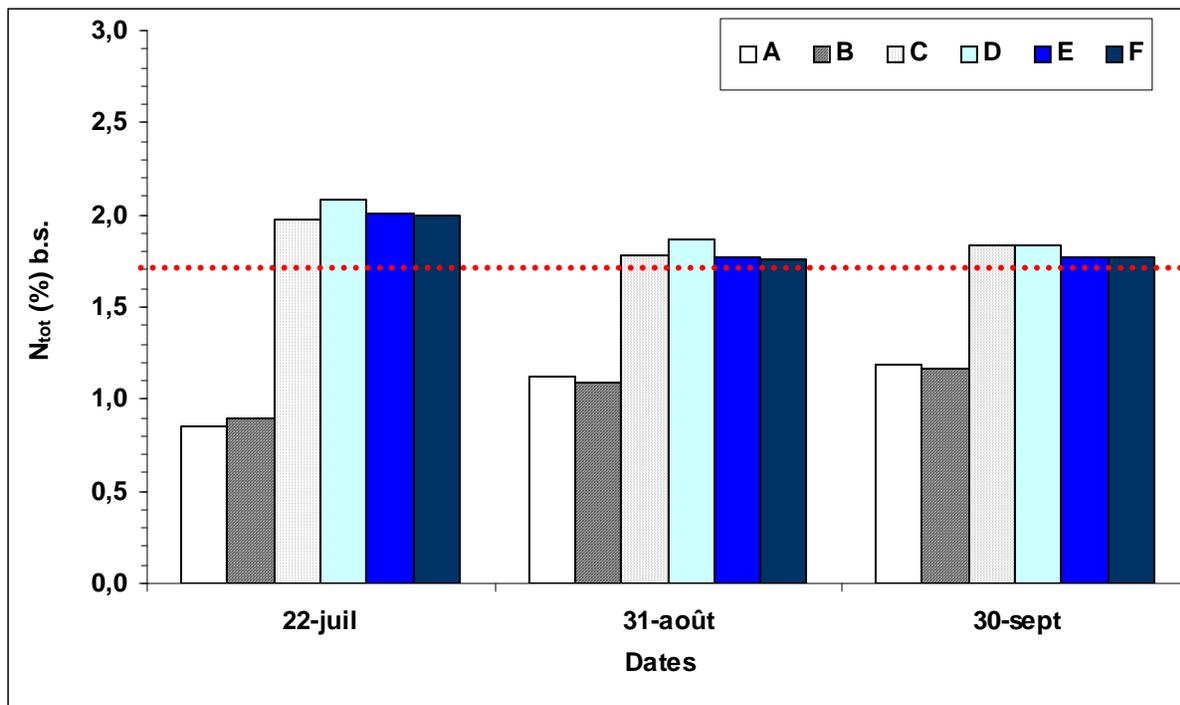


**Figure 21.** Contenu en N-NO<sub>3</sub> (KCl) de la strate 0-20 cm de sol selon la fertilisation et les consignes d'irrigation en 2010.

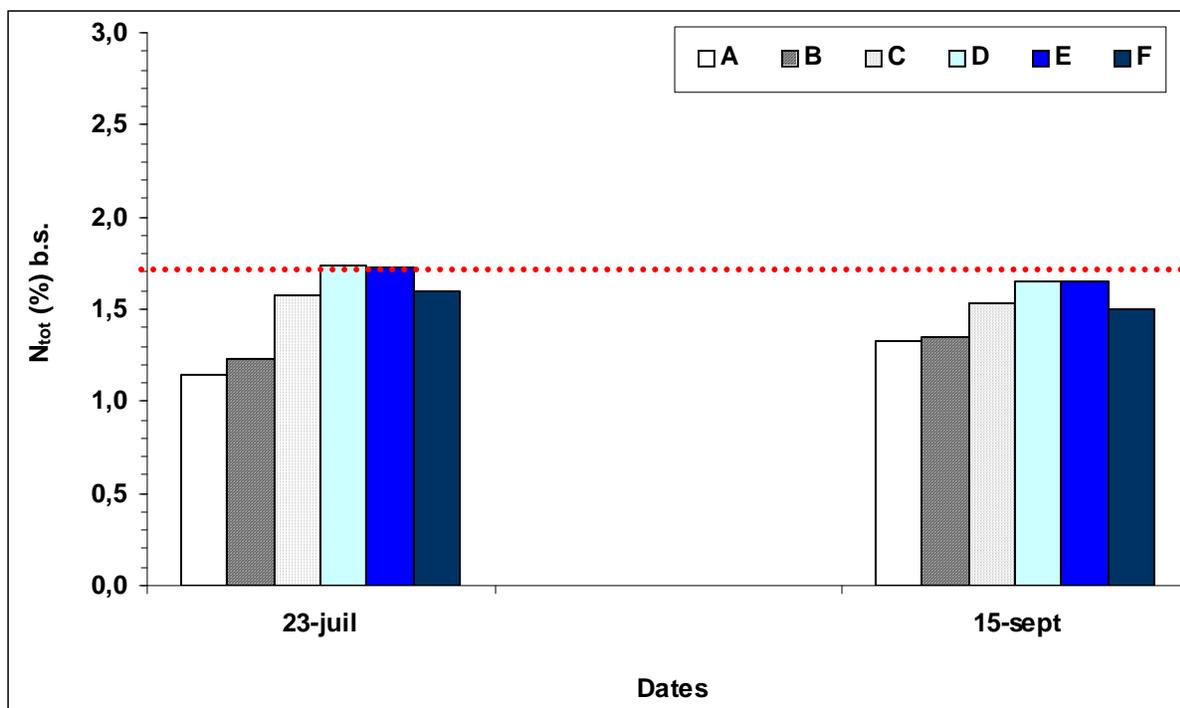
#### 4.6 Statut nutritionnel des plants selon la fertilisation azotée et les diverses consignes d'irrigation

Le suivi nutritionnel des plants indique que les plants non fertilisés sont déficients en azote, qu'ils soient irrigués (B; I<sub>70%</sub>-N<sub>0</sub>) ou non (A; I<sub>0%</sub>-N<sub>0</sub>), les deux années, avec des valeurs sous, ou avoisinant, 1 % de N<sub>tot</sub> (b.s.) (Figure 22 et Figure 23). Pour ces deux traitements, la différence avec les parcelles fertilisées est hautement significative ( $P < 0,001$ ). Toutefois, avec le temps, les bleuetiers non fertilisés en N semblent s'adapter à l'absence de fertilisation azotée et améliorent leur statut nutritionnel. Ainsi, en 2010, ces plants présentent des valeurs de N<sub>tot</sub> (b.s.) entre 1,14 et 1,35 %, comparativement à des valeurs entre 0,86 et 1,18 % en 2009. En fait, si au 22 juillet 2009 leur teneur en N<sub>tot</sub> ne vaut que 44 % de celle des plants témoins fertilisés C (I<sub>0%</sub>-N), au 15 septembre 2010, elle en vaut 87 %. Ces mesures concordent avec ce qui a été observé pour les gains en hauteur présentés aux figures 8 et 9. En effet, si les plants non fertilisés A (I<sub>0%</sub>-N<sub>0</sub>) et B (I<sub>70%</sub>-N<sub>0</sub>) présentaient des hauteurs moindres en 2009, à l'automne 2010, ils rejoignaient la hauteur des plants du traitement C (I<sub>0%</sub>-N), fertilisés en N mais non irrigués.

Par ailleurs, en 2009, l'ensemble des plants des parcelles fertilisées présente des concentrations foliaires en N<sub>tot</sub> se situant dans l'intervalle des concentrations adéquates, i.e. entre 1,7 et 2,3 % (MAAAO, 2011). Par contre, en 2010, les teneurs en N<sub>tot</sub> des plants de ces parcelles s'abaissent pour se situer entre 1,51 et 1,74 %, se retrouvant ainsi égales ou plus basses que le seuil de 1,7 %. Ainsi, bien que la fertilisation ait été haussée en 2010 de 25 à 30 kg N ha<sup>-1</sup> pour tenir compte du fait que les plants avaient poussé, un apport plus élevé aurait été nécessaire. Dans le cas des parcelles irriguées, cette baisse du statut nutritionnel aurait peut-être *a priori* pu être attribuée à une perte d'une partie de l'azote par lessivage, puisque 2010 a été une année demandant plusieurs irrigations dès le début de la saison. Toutefois, tel que mentionné précédemment, ce sont les plants du traitement le plus irrigué (F; I<sub>90%</sub>-N) qui présentent le meilleur développement et potentiel de rendement. De plus, le traitement C (I<sub>0%</sub>-N), non irrigué, présente lui aussi une importante baisse des teneurs foliaires de N<sub>tot</sub> de 2009 à 2010. Si l'irrigation en avait été la principale cause, ces plants non irrigués, auraient maintenu leur concentration en N tandis que les plants irrigués auraient vu la leur s'abaisser, ce qui n'est pas le cas. Pour l'ensemble de ces raisons, il est raisonnable de penser que la cause de cette diminution n'est pas liée à une perte d'azote par lessivage consécutive à une irrigation excessive.



**Figure 22.** Contenu en  $N_{\text{total}}$  des feuilles de bleuëtiers, selon la fertilisation azotée et la consigne d'irrigation en 2009. La ligne transversale rouge indique le seuil minimal adéquat de N.



**Figure 23.** Contenu en  $N_{\text{total}}$  des feuilles de bleuëtiers, selon la fertilisation azotée et la consigne d'irrigation en 2010. La ligne transversale rouge indique le seuil minimal adéquat de N.

En ce qui a trait à l'impact de l'irrigation, en 2009, tel que prévu considérant le peu d'irrigations effectuées, il n'existe aucune différence significative entre les traitements. Par contre, en 2010, certaines tendances se dessinent dès le mois de juillet et elles se concrétisent en fin de saison. Ainsi, au 23 juillet, le  $N_{\text{tot}}$  foliaire des plants non irrigués (C) est moindre que celui des plants irrigués à 50 et 70 % de la RU (D,  $P < 0,04$ ; E,  $P = 0,06$ ), mais il est similaire à celui des plants les plus irrigués (F, 90 % de la RU). Entre les plants irrigués, le  $N_{\text{tot}}$  foliaire des plants les plus irrigués (F) est similaire à celui des plants des parcelles intermédiaires (E), mais il est moindre que celui des plants les moins irrigués (D,  $P = 0,06$ ). En septembre, les différences entre les plants des traitements C, D et E se sont estompées (D et E,  $P = 0,13$ ). Par contre, la différence s'est accentuée entre les plants les plus irrigués (F) et ceux des consignes moins sévères (D,  $P < 0,05$ ; E,  $P = 0,06$ ). Par contre, il n'y a toujours aucune différence avec les plants non irrigués (C). Suivant les plus grandes hauteurs produites par les plants F, ces résultats suggèrent que les bénéfices de l'irrigation auraient peut-être été bonifiés par un apport en N plus élevé qui aurait mieux supporté une croissance vigoureuse et la demande en nutriment qui l'accompagne.

Pour ce qui est des éléments majeurs et mineurs également dosés, les plants des parcelles fertilisées présentent tous des teneurs foliaires en P, K, Ca, Mg et B au-dessus du seuil minimal, sauf pour le P en 2010, avec des valeurs autour de 1 100 mg kg<sup>-1</sup>, ce qui est sous les 1 500 mg kg<sup>-1</sup> recommandés (MAAAO, 2011).

#### 4.7 Diffusion des résultats

<i>Activités prévues</i>	<i>Activités réalisées pour la période couverte par le rapport</i>	<i>Description (thème, titre, endroit, etc.)</i>	<i>Date de réalisation</i>	<i>Nombre de personnes rejointes</i>	<i>Visibilité accordée au CDAQ et à AAC (logo, mention)</i>
Présentation générale du projet	<a href="http://www.irda.qc.ca/fr/Liste-des-projets-en-cours/232">http://www.irda.qc.ca/fr/Liste-des-projets-en-cours/232</a>	Site Web de l'IRDA	Mai 2008	Élevé	Mention
Fiche technique	Présentation et démarrage du projet : <a href="http://www.irda.qc.ca/documents/Results/155.pdf">http://www.irda.qc.ca/documents/Results/155.pdf</a>  Fiche synthèse année 1 : <a href="http://www.irda.qc.ca/documents/Results/218.pdf">http://www.irda.qc.ca/documents/Results/218.pdf</a>	Site Web de l'IRDA et d'Agri-Réseau	Juillet 2008  Juillet 2010	Élevé	Logo, mention
Journée de démonstration de type portes ouvertes	Portes ouvertes Deschambault 2008  Demi-journée de la recherche  Portes ouvertes Deschambault 2010	Station de recherche de Deschambault	10 juillet 2008  11 septembre 2009  26 août 2010	100 - 120  25-50  100	Mention
Rapport d'étape N°1  Rapport d'étape N°2	Dépôt du rapport d'étape au CDAQ	Présentation de l'avancement du projet	Avril 2009  Avril 2010	Variable	Logo, mention
Conférences	Colloque sur l'irrigation en horticulture, CRAAQ	Hôtel Universel Best Western, Drummondville	25 novembre 2010	200	Mention

Conférences (suite)	Les journées agricoles et agroalimentaires Montréal-Laval-Lanaudière <a href="http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/LavalLanaudiere/JourneesAgricoles2011/10h45CarlBoivin.pdf">http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/LavalLanaudiere/JourneesAgricoles2011/10h45CarlBoivin.pdf</a>	Club de golf de Joliette	25 janvier 2011	75-100	Mention
	Journée horticole de l'Estrie <a href="http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/Estrie/J_info_documents/J_Horti_Estrie2011CBoivin.pdf">http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/Estrie/J_info_documents/J_Horti_Estrie2011CBoivin.pdf</a>	Hôtellerie Jardin de Ville, Sherbrooke	9 mars 2011	50	Mention
	Les journées horticoles <a href="http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/Montérégie-Ouest/Journees_horticoles_2011/ProgrammeJourneesHorticoles2011.pdf">http://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/Montérégie-Ouest/Journees_horticoles_2011/ProgrammeJourneesHorticoles2011.pdf</a>	St-Rémi	8 décembre 2011		
Journée de formation	Groupe d'experts en protection des petits fruits	Manoir du lac William, Saint-Ferdinand	29 mars 2011	40	Mention
Résumé de conférence	<a href="http://www.agrireseau.qc.ca/petitsfruits/documents/Boivin_resume.pdf">http://www.agrireseau.qc.ca/petitsfruits/documents/Boivin_resume.pdf</a>	Cahier de conférence, site Web d'Agri-Réseau	Déposé en ligne le 22 décembre 2010	Variable	Mention
Rapport final	Dépôt du rapport d'étape au CDAQ	Site Web de l'IRDA et d'Agri-Réseau	Octobre 2011		Logo
Fiche synthèse du projet		Site Web de l'IRDA et d'Agri-Réseau	Automne 2011		Logo
Articles vulgarisés et scientifiques		Revue spécialisées	À venir	Selon affluence	Logo, mention

## 5 CONCLUSIONS

Les résultats de cette étude démontrent qu'il existe une synergie entre la fertilisation N et la gestion de l'eau dans le développement et la productivité des bleuetiers et qu'il faut en tenir compte lors de la planification de la fertilisation azotée. En effet, tant la fertilisation que l'irrigation ont eu des impacts positifs sur le développement des plants et la production de fleurs. Toutefois, l'impact de l'irrigation est particulièrement ressorti, et ce, malgré une saison 2009 qui n'a pas connu de grands épisodes de déficit hydrique et durant laquelle la majorité des bleuetiers n'ont été que peu et tardivement irrigués dans la saison. En effet, au bout des trois saisons d'étude, les plants non fertilisés irrigués (B) (I<sub>70%</sub>-N<sub>0</sub>) ont présenté une hauteur et un nombre de fleurs qui n'étaient pas statistiquement moindres que ceux des plants fertilisés non irrigués (C) (I<sub>0%</sub>-N). De plus, ce sont les plants fertilisés en N et les plus irrigués (F) (I<sub>90%</sub>-N) qui tendent à donner la meilleure productivité (hauteur et fleurs). Par contre, en terme d'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation, les plants du traitement D (I<sub>50%</sub>-N) se démarquent avec 0,9 litres d'eau appliqués par fleur produite, comparativement à 1,2 litres pour les plants des traitements F (I<sub>90%</sub>-N). De plus, en ce qui a trait au gain en hauteur, les plants du traitement D (I<sub>50%</sub>-N) performant encore avec 11,8 litres appliqués par cm de gain en hauteur (hauteur finale – initiale), comparativement à 38,8 litres pour les plants du traitement F (I<sub>90%</sub>-N) pour des hauteurs finales similaires. Quoiqu'il en soit, d'un point de vue de production, il demeure tout de même que les plants du traitement F ont significativement produit 35% plus de fleurs que ceux du traitement D.

Par ailleurs, le suivi du N disponible en solution du sol et du statut nutritionnel des plants suggère fortement que les bénéfices de l'irrigation auraient pu être bonifiés par un apport en N plus élevé. En effet, l'analyse foliaire indique que les plants fertilisés, incluant ceux non irrigués, ont globalement manqué de N, mais que ce sont les plants les plus irrigués (F) (I<sub>90%</sub>-N), présentant la meilleure productivité, qui présentent la plus forte baisse de leur statut nutritionnel. D'ailleurs, le contenu en nitrates dans la solution du sol de ces parcelles y était le plus bas, indiquant une forte activité de prélèvement du N disponible. Ainsi, dans le cas de plants plus âgés, ayant atteint le stade de production intensive, ce besoin accru de N en présence d'apports en eau pourrait s'exprimer davantage. De plus, avec les années, les bénéfices de l'irrigation sur la croissance des plants pourraient être cumulatifs puisque lors des saisons plus sèches, la disponibilité de l'eau à la plante ne serait pas un facteur limitatif si l'irrigation est pratiquée. Ainsi, lors de la planification de la fertilisation N des bleuetières, il serait bon de conseiller aux producteurs de moduler les apports N en conséquence si l'emploi de l'irrigation est envisagé.

Enfin, cette étude démontre aussi que les nitrates jouent un rôle central dans la dynamique du N du sol dans les années d'implantation, alors que le pH du sol continue à s'acidifier, et que l'apport de N minéral est fait uniquement sous forme d'ammonium. En fait, il ressort que les ions ammonium des engrais sont rapidement transformés en ions nitrates et donc, que l'impact de la fertilisation se déplace sur ceux-ci. Or, les ions nitrates ont une mobilité dans le sol tout à fait différent des ions ammonium. Contrairement à ces derniers, qui ont la capacité de se fixer aux particules de sol, le transport des ions nitrates est contrôlé par le mouvement de masse de l'eau et ils seront lessivés avec celle-ci en cas de transport d'excès d'eau dans le profil de sol. Ceci renforce l'importance pour les producteurs de gérer adéquatement l'irrigation de façon raisonnée en fonction de consignes mesurables et spécifiques aux caractéristiques physiques des sols en culture.

## 6 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à souligner la précieuse collaboration des ouvriers de la ferme expérimentale de Deschambault au projet. Notre appréciation s'étend également à l'entreprise HORTAU 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 coll. (éd.). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Agronomy Monograph no. 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.

**Baker, M.L. et K. Patten.** 1988. *Texas Blueberry Handbook*. 220 pages.

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

**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. 2<sup>nd</sup> edition. Madison, WI.

**Gupta, U.C.** 1993. Boron, molybdenum and selenium. p. 91-99. *In* M.R. Carter (éd.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.

**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.

**Lareau, M. et L. Urbain.** 2008. *Culture du bleuets en corymbe*. CRAAQ éd., Québec, 72 pages.

**Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W.W., Wolfinger, R.D. et Schabenberger, O.** 2006. *SAS for mixed models*, second edition. Cary, NC : SAS Institute inc.

**MAAAO.** 2011. Publication 360F, Recommandations pour les cultures fruitières : Nutrition - Petits fruits - Bleuets en corymbe. Consulté en ligne le 13 juillet 2011. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/pub360/5blunutr.htm>.

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

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

**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 (éd.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.