

Caractérisation de l'usage de l'eau en irrigation

Rapport final

Synthèse des résultats 2013 à 2015

Rapport présenté au :
Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et
de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)



**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec 

Rédigé par :

Carl Boivin – IRDA
Jérémy Vallée – IRDA
Paul Deschênes – IRDA
Mikael Guillou – DAEDD MAPAQ
Daniel Bergeron – DRCN MAPAQ

Mars 2016

L'IRDA a été constituée en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) et le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche, de la Science et de la Technologie (MESRST).



Notre mission

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

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

Ce projet a été réalisé grâce à une aide financière du MAPAQ.

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec 

Équipe de réalisation du projet

IRDA	Carl Boivin, agr., M.Sc. Jérémy Vallée, agr. Paul Deschênes, agr., M.Sc. Stéphane Nadon, t.a.
MAPAQ	Mikael Guillou, agr., M.Sc. - DAEDD Daniel Bergeron, agr., M.Sc. - DRCN Mélicha Gagnon, agr. - DRMLL-LAN Lucie Caron, agr. - DRL Isabelle Couture, agr., M.Sc. - DRMONT-E Christine Villeneuve, agr. - DRMONT-O Mario Leblanc, agr., M.Sc. - DRMONT-O
Clubs-conseils	Nadia Surdek, agr. - PleineTerre Sophie Guimond, agr. - PleineTerre Isabelle Dubé, agr. - Club-conseil Profit-eau-sol Amélie Lepage, t.p. - Poussée de Croissance
Entreprises agricoles	Nous remercions les 24 entreprises agricoles ayant participé aux essais de 2013 à 2015.

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

Carl Boivin
IRDA
2700, rue Einstein
Québec, (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 430
Télécopie : 418 644-6855
carl.boivin@irda.qc.ca

Le rapport peut être cité comme suit :

Boivin, C., J. Vallée, P. Deschênes, M. Guillou et D. Bergeron. 2016. Caractérisation de l'usage de l'eau en irrigation. Rapport final - Synthèse des résultats 2013-2015. IRDA. 26 p.

Table des matières

Table des matières.....	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux.....	v
Avis au lecteur et limites du rapport.....	1
Description du projet.....	2
1 Objectif général.....	2
1.1 Objectifs spécifiques.....	2
Faits saillants.....	3
Caractéristiques des sites à l'étude	4
Suivi saisonnier de la régie d'irrigation	7
2 Bilan global.....	7
2.1 Durée moyenne d'un épisode d'irrigation	7
2.2 Volume moyen par épisode d'irrigation.....	8
2.3 Volume d'eau total mesuré.....	9
2.4 Durée visée d'un épisode d'irrigation	10
2.4.1 Durée visée avec débit théorique	10
2.4.2 Durée visée avec débit réel.....	11
2.4.3 Débit réel versus débit théorique.....	11
2.4.4 Explications à propos de l'écart observé entre la durée visée « débit théorique » et « débit réel ».....	13
2.4.4.1 Pression d'opération.....	13
2.4.4.2 Colmatage des filtres.....	14
2.4.4.3 Colmatage du système au fil de la saison.....	15
2.4.4.4 Uniformité d'application	16
2.5 Départ, durée et fréquence des apports en eau par l'irrigation.....	17
2.5.1 Assèchement du sol en périphérie du tube de goutte à goutte	18
2.5.1.1 Détournement des précipitations par le paillis de plastique.....	19
2.5.2 Indicateurs de compaction.....	21
3 Économies d'eau.....	22
3.1 Économie d'eau par épisode.....	22
3.2 Économie d'eau à l'échelle de la saison.....	23
Axes d'optimisation de l'usage de l'eau d'irrigation.....	24
4 Adoption d'une régie raisonnée de l'irrigation.....	24
4.1 Les objectifs de l'irrigation.....	24
4.2 Caractérisation des propriétés physiques du sol	24
4.3 Utiliser des outils	24
4.4 Complexe et relève du service-conseil	25
Références bibliographiques.....	26

Liste des figures

Figure 1. Durée moyenne d'un épisode d'irrigation (minutes) selon le site et la saison.	7
Figure 2. Volume moyen d'un épisode d'irrigation (m ³ /ha) selon le site et la saison.	8
Figure 3. Durée visée d'un épisode d'irrigation (minutes) établie avec débit fabricant selon le site et la saison.	10
Figure 4. Durée visée d'un épisode d'irrigation (minutes) établie avec le débit réel selon le site et la saison.	11
Figure 5. Écart entre la durée visée avec débit réel et débit théorique (minutes) selon le site et la saison.	12
Figure 6. Débit d'un goutteur (lph) selon la pression (psi) – Modèle TORO EAFC506 1234.	13
Figure 7. Débit en eau (lpm) affecté par le colmatage du filtre – Site 21, saison 2015.	14
Figure 8. Débit par goutteur (lph) du 1 ^{er} au 68 ^e épisode mesuré – Site 20, saison 2014.	15
Figure 9. Profil transversal des hauteurs d'eau recueillies – Site 2, saison 2014.	16
Figure 10. Teneur en eau volumique (A), précipitations et épisodes d'irrigation (B) - Site 7, saison 2014.	19
Figure 11. Teneur en eau volumique, précipitations et épisodes d'irrigation - Site 18, saison 2015.	20
Figure 12. Indicateur de compaction par l'absence de réponse de la sonde TDR en profondeur – Site 10, en 2013.	21
Figure 13. Économie d'eau potentielle moyenne par épisode (m ³ /ha) selon le site et la saison – Gag.	22
Figure 14. Économie d'eau potentielle moyenne par épisode (m ³ /ha) selon le site et la saison – Aspersion.	23

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques générales des sites 1 à 6 – Montérégie Ouest – Sol organique.	4
Tableau 2. Caractéristiques générales des sites 7 à 14 – Montérégie Est – Sol minéral.	5
Tableau 3. Caractéristiques générales des sites 15 à 18 – Laurentides – Sol minéral.	5
Tableau 4. Caractéristiques générales des sites 19 à 22 – Montérégie Ouest – Sol minéral.	6
Tableau 5. Caractéristiques générales des sites 23 à 25 – Lanaudière – Sol minéral.	6
Tableau 6. Volume total en eau (m ³ /ha) mesuré selon le site et la saison.	9
Tableau 7. Appréciation du moment pour déclencher, de la durée et de la fréquence d'un épisode d'irrigation en termes de nombre de sites selon la saison.	17
Tableau 8. Durée des épisodes d'irrigation et réponse de la sonde TDR placée à 30 cm de profondeur - Site 18, 2015.	21

Avis au lecteur et limites du rapport

Le projet intitulé « Caractérisation de l'usage de l'eau en irrigation » a fait l'objet d'un rapport complet où les données recueillies y sont présentées et la méthodologie utilisée y est détaillée. Le présent rapport propose une synthèse des résultats et des axes de réflexions.

Il est à noter que l'axe d'analyse des données repose principalement sur la caractérisation des propriétés physiques du sol. Quoiqu'une bonne connaissance du sol en culture soit le point de départ d'une régie raisonnée de l'irrigation, d'autres facteurs interviennent aussi dans le développement d'une telle régie. Parmi ceux-ci, il y a la culture (cultivar, stade développement, valeur \$/ha, etc.), les ressources (approvisionnement en eau, coût de l'irrigation, main d'œuvre, etc.) et les objectifs de l'irrigation (qualité, rendements, environnement, etc.).

Les conclusions discutées dans ce rapport se rapportent à des cas précis. Les valeurs et les données recueillies lors des suivis reflètent, autant que nous sachions, l'usage de l'eau d'irrigation aux sites étudiés. Cette démarche visait principalement à documenter les régies d'irrigation des producteurs afin de déterminer des possibilités d'amélioration.

Selon les sites et les années, l'acquisition des données n'a pu être possible de manière continue sur l'ensemble de la saison. Des bris techniques, des limites techniques ou un manque de compatibilité entre les équipements utilisés et les systèmes d'irrigation en place sont les principales raisons qui expliquent la non-continuité de l'ensemble des données.

L'analyse de certains équipements est spécifique aux conditions d'essais et pourrait ne pas représenter les performances techniques normalement observées. Malgré toute l'attention portée au document, il est possible que certaines erreurs ou omissions puissent être présentes. Enfin, il est à noter que pour des raisons de confidentialité, l'identité des entreprises qui ont participé à ce projet n'est pas divulguée.

Description du projet

Selon le Profil sectoriel de l'industrie horticole au Québec (ISQ-MAPAQ, 2014), il y a 5155 entreprises qui cultivent des pommes de terre, des légumes de champ, des pommes, des bleuets nains et en corymbe, des canneberges, des fraises et des framboises. Ces superficies en culture sont susceptibles de recevoir un apport en eau par l'irrigation et représentent donc un potentiel irrigable total de 86 000 ha. Des données issues du recensement de Statistiques Canada de 2006 indiquent que 24 847 ha étaient irrigués au Québec et que 49 694 ha étaient équipés pour recevoir un apport en eau par l'irrigation (Statistiques Canada, 2008; FAO, 2016).

Ce projet s'est intéressé à l'usage de l'eau d'irrigation dans le secteur maraîcher sur le territoire couvert par l'entente du Bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. Pour ce faire, 24 entreprises ont fait l'objet d'un suivi durant 3 saisons, de 2013 à 2015. Ces dernières sont situées dans les quatre régions agricoles suivantes : Montérégie Est, Montérégie Ouest, Montréal-Laval-Lanaudière et Laurentides. Au total, c'est 75 sites qui ont fait l'objet d'une caractérisation et d'un suivi.

Cette diversité de sites a permis d'acquérir des données en sols organiques et minéraux et dans une diversité de légumes de champ tels que le cantaloup, la carotte, le céleri, le concombre, le chou, le chou-fleur, la laitue, le melon, l'oignon, le poivron, la tomate et le zucchini. Certains sites ont été irrigués avec un système par aspersion (canon, gicleurs) alors que d'autres l'ont été par goutte à goutte. Enfin, différents systèmes culturaux, avec ou sans paillis de polyéthylène, sol butté, culture intercalaire, etc. ont été rencontrés.

1 Objectif général

Effectuer la caractérisation de l'usage de l'eau en production maraîchère dans quatre régions agricoles du Québec pour cibler des axes d'optimisation dans l'usage de la ressource.

1.1 Objectifs spécifiques

- Évaluer la dose d'application d'eau d'irrigation apportée par un épisode d'irrigation.
- Déterminer la réserve en eau facilement utilisable par la culture pour chacune des entreprises participantes.
- Effectuer un suivi saisonnier de la régie du producteur.

Faits saillants

Pour un même site lors d'une même saison, la durée des épisodes d'irrigation et par conséquent, le volume d'eau apporté sont très variables. Lorsque l'enracinement de la culture est maximal et que le déclenchement d'un épisode d'irrigation s'appuie sur une consigne, la durée des épisodes d'irrigation devrait être semblable, tout comme le volume d'eau apporté. Toutefois, un seul site, sur les 25 qui ont été suivis annuellement, avait recours à des outils de mesure du statut hydrique du sol (ex. tensiomètre).

Pour une même durée d'irrigation, le volume d'eau réellement appliqué au champ diffère généralement du volume estimé à partir des informations fournies par le fabricant du système d'irrigation utilisé. Cet écart démontre l'importance de valider le volume d'eau réellement appliqué au champ. Le colmatage du filtre ou des goutteurs et l'uniformité d'application de l'eau peuvent être responsables de cet écart. Il devient alors hasardeux d'utiliser les spécifications du fabricant pour établir le volume d'eau utilisé si l'uniformité d'application en eau du système d'irrigation n'a pas été validée au préalable.

L'appréciation générale du moment où l'irrigation a été déclenchée, de la durée des épisodes et de la fréquence de ces derniers soutient que la plupart du temps, l'irrigation devrait être déclenchée plus tôt, que la durée moyenne d'un épisode est trop longue (sites en goutte à goutte) et que la fréquence des apports est insuffisante. Ces constats renseignent sur le potentiel d'économie en eau à réaliser pour les sites en goutte à goutte à l'échelle d'un épisode et le risque que représente cette situation pour la perte d'éléments nutritifs par lessivage.

La fréquence des apports étant insuffisante, l'économie d'eau à l'échelle d'une saison est incertaine. Une meilleure utilisation de l'eau par la culture est certainement possible, mais non sans l'appui d'un service-conseil. Enfin, aucune économie d'eau n'est envisageable pour les sites en sols organiques.

En ce qui a trait aux 18 sites suivis (6 sites/an) qui étaient en sol organique, il a été constaté que la laitue semée n'était pas irriguée, mais celle plantée l'était. De plus, le céleri était irrigué à la plantation et peu de temps avant la récolte. Enfin, l'oignon, où la croissance est généralement longue, était la culture qui a été la plus irriguée.

Caractéristiques des sites à l'étude

Pour chacun des sites et selon la saison, la texture du sol en question, le type de système d'irrigation, la culture et l'apport en eau ciblé sont présentés aux Tableaux 1 à 5. L'apport ciblé correspond à ce qui devrait être apporté lors d'un épisode d'irrigation (profondeur d'enracinement considérée de 30 cm). Cet apport a été déterminé à partir de la caractérisation des propriétés physiques du sol¹, l'enracinement de la culture et le type de système d'irrigation. Pour les sites irrigués par goutte à goutte (gag), l'apport ciblé est présenté en m³/ha, alors que pour les sites irrigués par aspersion, l'apport ciblé est présenté par une hauteur d'eau en mm.

En ce qui a trait à la texture du sol, des lettres ont été utilisées pour alléger les tableaux :

- A (argile), L (loam) et S (sable)
- L-A (loam argileux), L-S (loam sableux), L-S-A (loam sablo-argileux)
- S-L (sable loameux)

Tableau 1. Caractéristiques générales des sites 1 à 6 – Montérégie Ouest – Sol organique.

Sites	Saisons	Type de sol	Systèmes d'irrigation	Cultures	Apport en eau ciblé (m ³ /ha)	(mm)	
1	2013	Organique	Gicleurs fixes	Céleri		40	
	2014			Laitue pommée semée		-	
				Laitue romaine plantée			
2015	Céleri			39			
2	2013		Canon	Oignon			42
	2014						50
	2015						50
3	2013		Organique	Gicleurs fixes	Céleri		54
	2014				Laitue pommée		-
		Laitue semée				72	
4	2013	Gicleurs fixes		Oignon			48
	2014				Laitue		-
	2015						57
5	2013	Canon		Céleri			32
	2014						88
	2015				Gicleurs fixes		48
6	2013	Canon ou Rampe	Oignon			30	
	2014					60	
	2015					72	

¹ Il est à noter que pour les sites en sol minéral, l'apport en eau ciblé a été déterminé avec une caractérisation des propriétés physiques effectuée sur des échantillons prélevés à 0-15 cm et 15-30 cm de profondeur. En ce qui a trait aux sols organiques, l'apport ciblé a été déterminé à partir d'échantillons prélevés à 15-30 cm de profondeur.

Tableau 2. Caractéristiques générales des sites 7 à 14 – Montérégie Est – Sol minéral.

Sites	Saisons	Textures du sol	Systèmes d'irrigation	Cultures	Apport en eau ciblé (m ³ /ha)	Apport en eau ciblé (mm)
7	2013	L-S à L-S-A	Gag	Poivron	-	
	2014			Melon	13,4	
	2015			Poivron	12,3	
8	2013	L		Tomate	26,1	
	2014			Piment de conserverie	14,8	
	2015			Piment de conserverie	19,6	
9	2013	L à L-A			31,7	
	2014			Cantaloup	-	
	2015				-	
10	2013	L-S fin			26,4	
	2014	A		Tomate	16,5	
	2015	L-S fin			27,4	
11	2013	S-L		Poivron	18,5	
	2014				30,5	
	2015		Melon	27,3		
12	2013	S fin-L		25,5		
	2014		Tomate (grands tunnels) ²	25,5		
	2015			25,5		
13	2013	L-S fin		66,0		
	2014	S-L	Poivron	83,6 ³		
	2015	S	Oignon	36,1		
14	2013	L-S fin	Concombre	-		
	2014		Oignon – Zucchini	12,7		
	2015		Zucchini	12,7		

Tableau 3. Caractéristiques générales des sites 15 à 18 – Laurentides – Sol minéral.

Sites	Saisons	Textures du sol	Systèmes d'irrigation	Cultures	Apport en eau ciblé (m ³ /ha)	Apport en eau ciblé (mm)
15	2013	L à L-S-A	Gag	Tomate	19,0	
	2014	L		Poivron	18,4	
	2015	L à L-S-A			29,0	
16	2013	L-S fin	Gag		-	
	2014	L-S		Chou-fleur	33,7	
	2015				45,1	
17	2013	S fin-L	Gicleurs fixes			38
	2014	L-S-A	Gag	Chou-fleur	-	
	2015		Gicleurs fixes			20
18	2013	L-A	Gag		18,8	
	2014	L		Tomate	22,8	
	2015	L-A			18,7	

² Même site les trois années.³ Ce site avait deux tubes de goutte à goutte par butte.

Tableau 4. Caractéristiques générales des sites 19 à 22 – Montérégie Ouest – Sol minéral.

Sites	Saisons	Textures du sol	Systèmes d'irrigation	Cultures	Apport en eau ciblé (m ³ /ha)	Apport en eau ciblé (mm)
19	2013	L-S-A à L-S fin	Gag	Chou	20,5	
	2014	L-S			8,9	
	2015				21,6	
20	2013	A	Gag	Tomate	-	
	2014	L			33,0	
	2015	L-S-A			27,4	
21A	2013	L-S fin	Canons fixes	Oignon		18
21A	2014			Chou		18
21	2015	L-S	Gag	Oignon	34,3	
22	2013	L	Gag	Poivron	-	
	2014	L-S			20,8	
	2015	L			15,3	

Tableau 5. Caractéristiques générales des sites 23 à 25 – Lanaudière – Sol minéral.

Sites	Saisons	Textures du sol	Systèmes d'irrigation	Cultures	Apport en eau ciblé (m ³ /ha)	Apport en eau ciblé (mm)
23	2013	S grossier	Gicleurs fixes	Carotte		20
	2014	S-L			13	
	2015	S grossier à S-L			13	
24	2013	S à S-L	Gicleurs fixes	Oignon		21
	2014	S-L			35	
	2015				35	
25	2013	S-L	Gag	Poivron	-	
	2014			16,3		
	2015			Cantaloup	11,3	

Suivi saisonnier de la régie d'irrigation

2 Bilan global

2.1 Durée moyenne d'un épisode d'irrigation

La durée moyenne, en minutes, d'un épisode d'irrigation est présentée la Figure 1 selon le site et la saison. Il est à noter que les sites 1 à 6 inclusivement représentent les sites en sols organiques, les autres sites sont en sols minéraux. En ce qui a trait aux types de systèmes d'irrigation, les sites 1 à 6 inclusivement et les sites 21A, 23 et 24 sont irrigués par aspersion, alors que les autres sites sont irrigués par goutte à goutte.

Pour l'instant, les informations présentées renseignent sur la variabilité de la durée moyenne des épisodes, pour un même site et une même saison. Par exemple, au site 18 en 2015, la durée moyenne d'un épisode était de 189 minutes avec un écart-type de plus ou moins 118 minutes, par rapport à la durée moyenne.

Lorsque l'enracinement est maximal et qu'une consigne de déclenchement est utilisée, la durée des épisodes d'irrigation devrait être identique, pour un champ et un système d'irrigation donné.

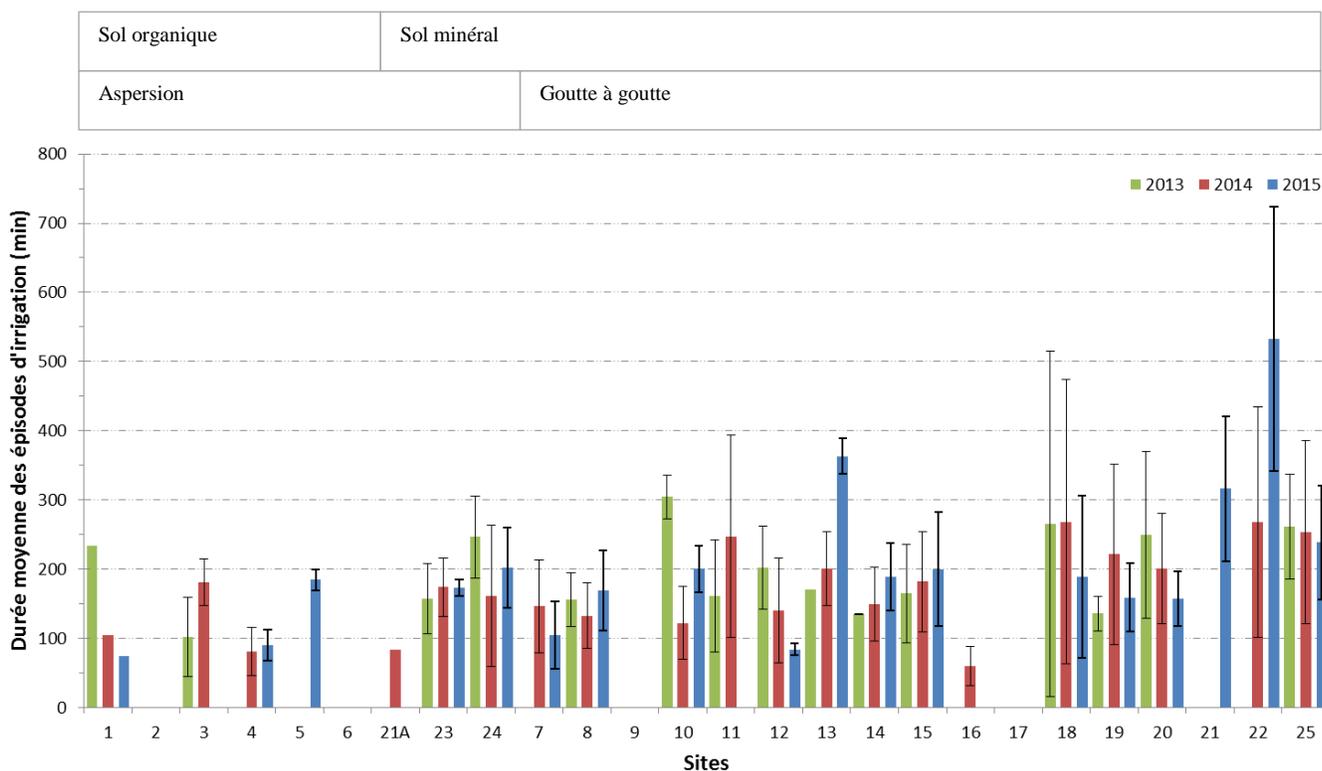


Figure 1. Durée moyenne d'un épisode d'irrigation (minutes) selon le site et la saison.

2.2 Volume moyen par épisode d'irrigation

Le volume d'eau moyen en mètres cubes par ha (m^3/ha) apporté lors d'un épisode d'irrigation est présenté à la Figure 2 selon le site et la saison. Les informations présentées renseignent sur la variabilité du volume en eau apporté lors des épisodes, pour un même site et une même saison. Par exemple, au site 18 en 2015, le volume moyen d'un épisode était de $46 m^3/ha$ avec un écart-type entre les apports de plus ou moins $30 m^3/ha$, par rapport au volume moyen.

Globalement, le volume moyen en eau apportée est supérieur pour les sites avec un système d'irrigation par aspersion (1 à 6 incl. et 21A, 23 et 24) comparativement au système par goutte à goutte, utilisé aux autres sites.

Lorsque l'enracinement est maximal et qu'une consigne de déclenchement est utilisée, le volume des épisodes d'irrigation devrait être identique, pour un champ et un système d'irrigation donné.

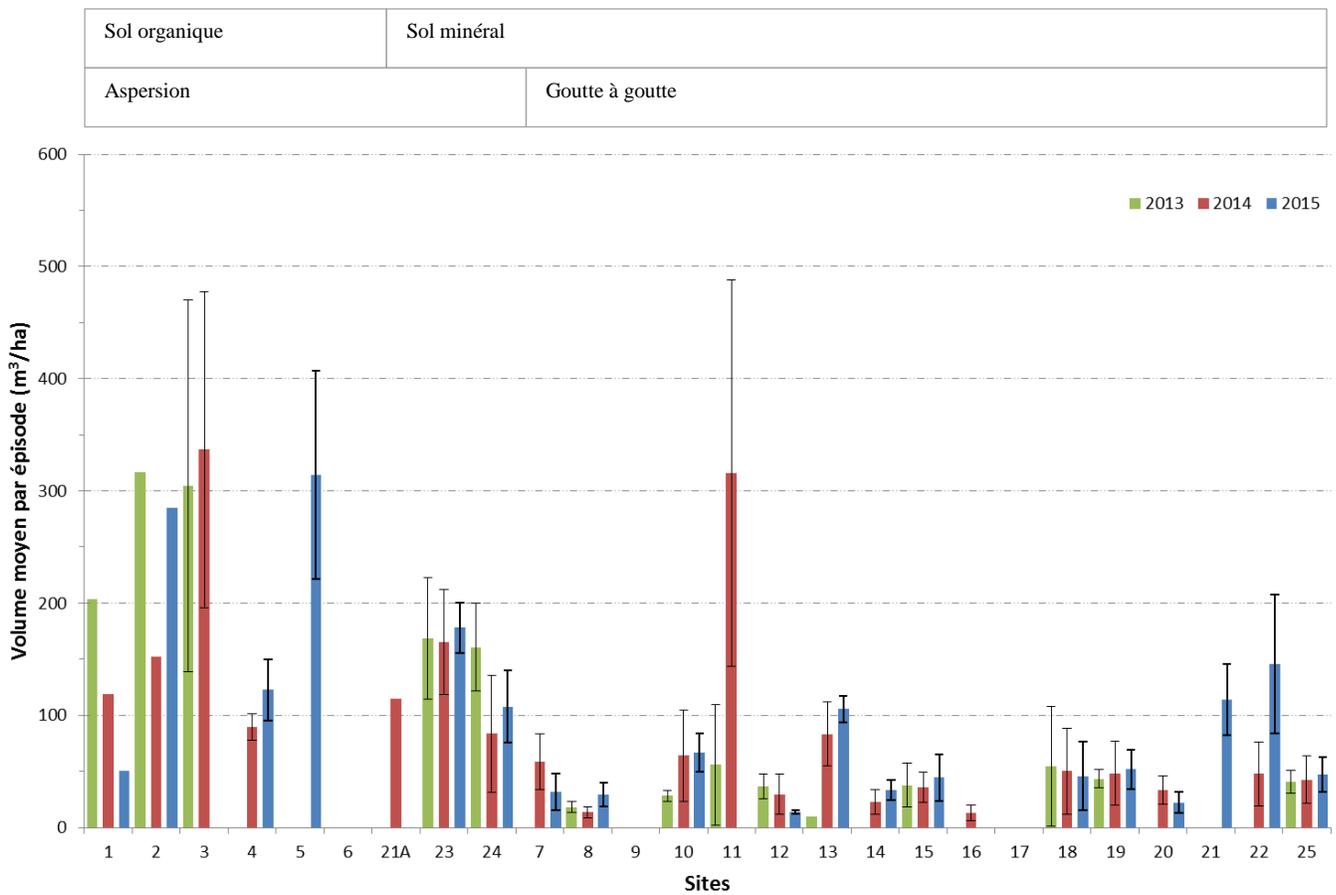


Figure 2. Volume moyen d'un épisode d'irrigation (m^3/ha) selon le site et la saison.

2.3 Volume d'eau total mesuré

Le volume d'eau total mesuré, en mètres cubes par hectare (m³/ha), pour chacune des saisons et selon le site, est présenté au Tableau 6. Il est à noter qu'il s'agit d'un volume d'eau mesuré par le débitmètre. Se référer au rapport complet pour vérifier la période de la saison qui a été couverte (Boivin et coll., 2016).

Tableau 6. Volume total en eau (m³/ha) mesuré selon le site et la saison.

Sites	2013		2014		2015	
	m ³ /ha	Cultures	m ³ /ha	Cultures	m ³ /ha	Cultures
1	203,7	Céleri	119,2	Laitue (2)	285,1	Céleri
2	951,2	Oignon	304,8	Oignon	nd	Oignon
3	1219,2	Céleri	814,8	Céleri	1716,0	Laitue pommée
4	NI	Laitue semée	178,5	Laitue / laitue	942,8	Oignon
5	NI	Céleri	NI	Céleri	NI	Céleri
6	NI	Oignon	NI	Oignon	1167,4	Oignon
7	nd	Poivron	1116,0	Melon	679,5	Poivron
8	166,0	Tomate miniature	310,0	Piment conserverie	NI	Piment conserverie
9	NI	Cantaloup	NI	Cantaloup	1533,0	Cantaloup
10	234,4	Tomate	383,3	Tomate	nd	Tomate
11	330,0	Poivron	5691,8	Poivron	3113,4	Melon
12	753,0	Tomate (tunnel)	323,7	Tomate (tunnel)	95,6	Tomate (tunnel)
13	46,4	Poivron	584,1	Poivron	135,2	Oignon
14	nd	Concombre	185,4	Oignon / Zucchini	783,3	Zucchini
15	264,5	Tomate	681,9	Poivron	nd	Poivron
16	nd	Chou-fleur	20,0	Chou-fleur	NI	Chou-fleur
17	nd	Chou-fleur	nd	Chou-fleur	1136,2	Chou-fleur
18	807,2	Tomate	1253,6	Tomate	2062,2	Tomate
19	460,6	Choux d'automne	1696,2	Chou	1521,5	Chou
20	nd	Tomate	744,9	Tomate	570,5	Tomate
21	NI	Oignon espagnol ⁴	nd	Chou ⁴	1957,0	Oignon
22	nd	Poivron	672,3	Poivron	1601,7	Poivron
23	2528,0	Carotte	2310,1	Carotte	862,5	Oignon
24	802,9	Oignon	669,3	Oignon	965,6	Oignon
25	nd	Poivron	727,8	Poivron	95,6	Cantaloup

NI : Pas eu d'irrigation

nd : données non disponibles

⁴ 21A

2.4 Durée visée d'un épisode d'irrigation

Il s'agit de la durée d'un épisode d'irrigation qui permet d'apporter un volume d'eau équivalent à l'apport en eau ciblé indiqué aux tableaux 1 à 5.

Dans le cadre de ce projet, ces valeurs ont été déterminées à partir des résultats de la caractérisation des propriétés physiques du sol, de l'enracinement et du système d'irrigation. Ces informations sont spécifiques à chacune des situations selon le site et la saison et sont présentées en détail dans le rapport complet (Boivin et coll., 2016) ou résumées aux Tableaux 1 à 5.

2.4.1 Durée visée avec débit théorique

Une fois le volume à apporter connu, deux approches pour déterminer la durée d'un épisode d'irrigation sont proposées (Théorique et Réelle). La première implique d'estimer la durée à partir des informations fournies par le fabricant du système d'irrigation utilisé.

Par exemple, un système par goutte à goutte de marque Aqua-Traxx (EAX0834) a, selon le fabricant, un débit par goutteur de 0,575 litre par heure, et ce, à une pression d'opération de 10 psi (68,9 kPa). En connaissant la longueur linéaire totale de tube de goutte à goutte pour un ha et le nombre de goutteurs y correspondant, il est possible de déterminer un volume d'eau appliqué par ha et par unité de temps. Donc, pour 1 ha où 7300 m linéaires de ce tube de goutte à goutte est installé, les 35 925 goutteurs/ha appliqueront un total de 20,7 m³/ha/heure. Si l'apport en eau ciblé est de 25 m³/ha, il faudra, en théorie, faire fonctionner le système durant 73 minutes.

La durée visée, établie avec le débit théorique, est présentée à la Figure 3 selon le site et la saison. Ainsi, pour le site 18 en 2015, un épisode d'irrigation devrait durer environ 97 minutes pour appliquer le 18,7 m³/ha d'eau ciblé.

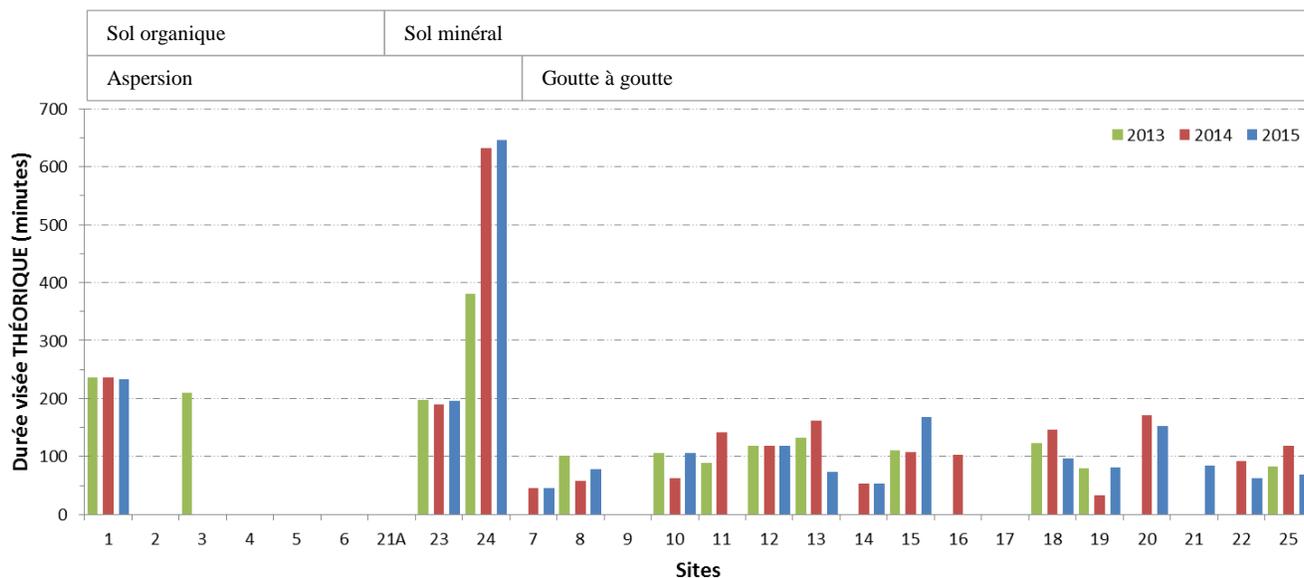


Figure 3. Durée visée d'un épisode d'irrigation (minutes) établie avec débit fabricant selon le site et la saison.

2.4.2 Durée visée avec débit réel

Maintenant, est-ce que le volume appliqué réellement au champ est le même que celui souhaité? Pour le savoir, il suffit de mesurer le volume appliqué (ex. débitmètre). Le débit et la durée d'un épisode sont ainsi déterminés à partir du volume que l'on souhaite appliquer. Ces valeurs sont présentées selon le site et la saison à la Figure 4.

Par exemple, pour le site 18, la durée visée, qu'elle soit estimée avec le débit fabricant (Figure 3) ou le débit réel (Figure 4), est comparable, soit respectivement 147 et 146 minutes, en 2014 ainsi que 97 et 96 minutes, en 2015. Toutefois, pour d'autres sites il y a un écart.

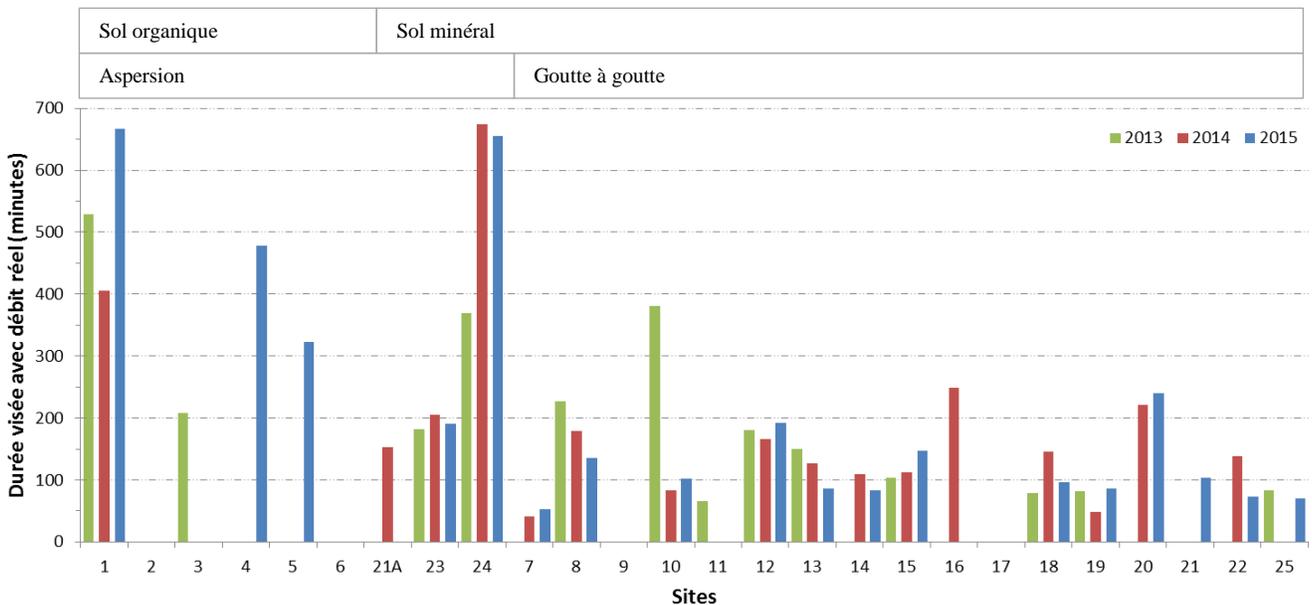


Figure 4. Durée visée d'un épisode d'irrigation (minutes) établie avec le débit réel selon le site et la saison.

2.4.3 Débit réel versus débit théorique

La durée visée établie avec les valeurs théoriques a été comparée à la durée visée établie avec les valeurs de débits réellement mesurés au champ (Figure 5). Une durée visée avec débit réel plus élevée que celle avec débit théorique indique que le débit en eau du système d'irrigation au champ est inférieur au débit attendu. À l'inverse, une durée visée avec débit réel plus petit que celle avec débit théorique indique que le débit au champ est supérieur au débit attendu. La durée visée observée est généralement plus élevée avec le débit réel.

Par exemple, pour le site 20 en 2015, l'apport ciblé en eau par l'irrigation, lorsque déclenché au bon moment, a été établi à 27,4 m³/ha (Tableau 4). Pour appliquer ce volume d'eau, il a été déterminé que la durée visée de l'épisode devrait être de 152 minutes (Figure 3). Toutefois, en mesurant le volume réellement appliqué au champ, la durée devrait être de 240 minutes (Figure 4). Conséquemment, l'écart entre la durée visée avec débit réel et théorique est de 88 minutes (Figure 5).

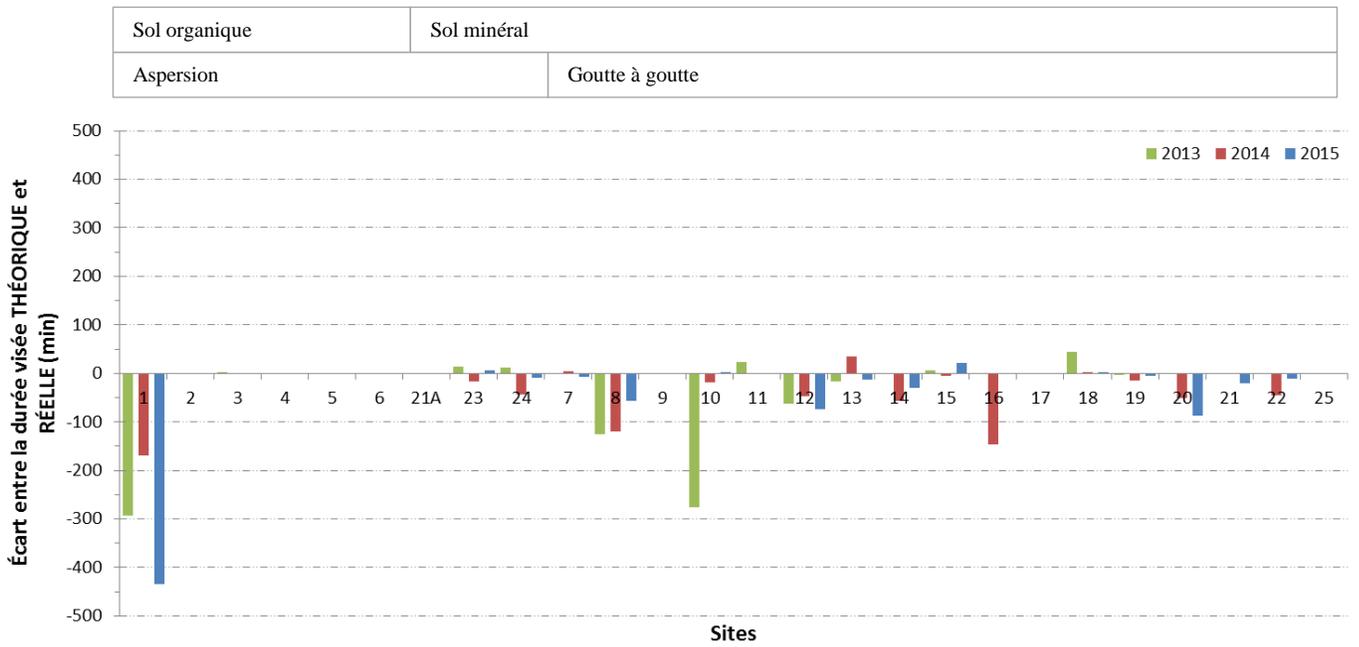


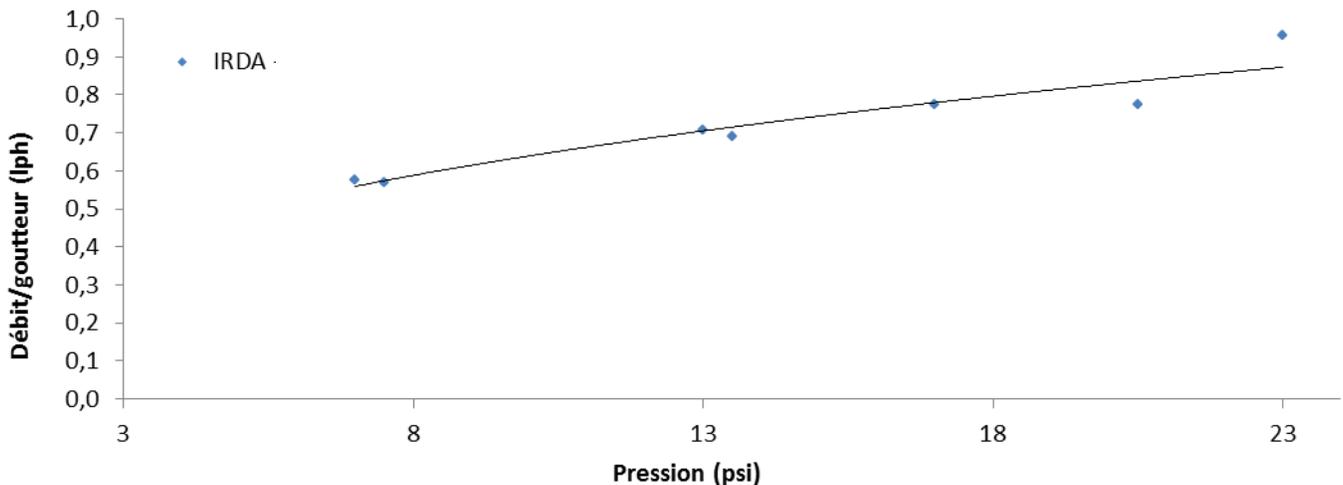
Figure 5. Écart entre la durée visée avec débit réel et débit théorique (minutes) selon le site et la saison.

2.4.4 Explications à propos de l'écart observé entre la durée visée « débit théorique » et « débit réel »

Si les conditions d'utilisation respectent les spécifications fournies par le fabricant, le débit mesuré au champ devrait être le même que celui fourni par le fabricant. Toutefois, des facteurs tels la pression d'opération, le colmatage du filtre ou des goutteurs et l'uniformité d'application de l'eau peuvent être responsables de l'écart qui peut y avoir entre les deux. De plus, des modifications au système par le producteur durant la saison qui ont pu, entre autres, modifier la longueur linéaire de tube de goutte à goutte considérée, des fuites conséquentes à des bris et aussi des erreurs de mesure peuvent expliquer l'écart observé.

2.4.4.1 Pression d'opération

Le débit par goutteur en litres par minute (lph) selon la pression mesuré au champ (Modèle TORO EAFC506 1234) est présenté à la Figure 6. Un débit d'environ 0,7 lph a été mesuré à 8 psi (55 kPa), alors qu'il a été d'environ 1 lph à 23 psi (159 kPa). Ces mesures ont été prises sur un système en marche où le régulateur de pression était adéquat et où le système était chargé (Nadon et coll., 2016). Des pressions aussi faibles que 3,5 psi (20,7 kPa) ont été mesurées et des extrêmes allant jusqu'à 23 psi. Dans ce cas précis, la pente du terrain explique en grande partie cette situation. Il est à noter que ce modèle de goutte à goutte est muni de compensateur de pression intégrée au goutteur (facteur de 0,3). Un modèle standard peut avoir un facteur de 0,5. En l'absence d'un tel dispositif, des écarts encore plus grands auraient été mesurés.



Tiré de : Nadon et coll. (2016)

Figure 6. Débit d'un goutteur (lph) selon la pression (psi) – Modèle TORO EAFC506 1234.

2.4.4.2 Colmatage des filtres

Le colmatage des filtres peut suffire à diminuer le débit d'eau qui parvient jusqu'au champ. Deux irrigations sont présentées à la Figure 7. L'axe vertical représente le nombre de lpm qui a été mesurée par le débitmètre, alors que l'axe horizontal indique le temps en minute depuis le début de l'épisode d'irrigation.

La durée de l'irrigation du 9 juillet a été d'environ 337 minutes. Le premier pic observé durant les 20 premières minutes représente la période de chargement en eau du système d'irrigation. Une fois ce chargement complété, la droite devrait se présenter en plateau (horizontal), mais elle diminue constamment jusqu'à la 200^e minute. Cette diminution a été attribuée au colmatage du filtre, qui a occasionné une résistance de plus en plus grande au passage de l'eau. À la 200^e minute, le filtre a été nettoyé, mais rapidement, la même situation s'est présentée.

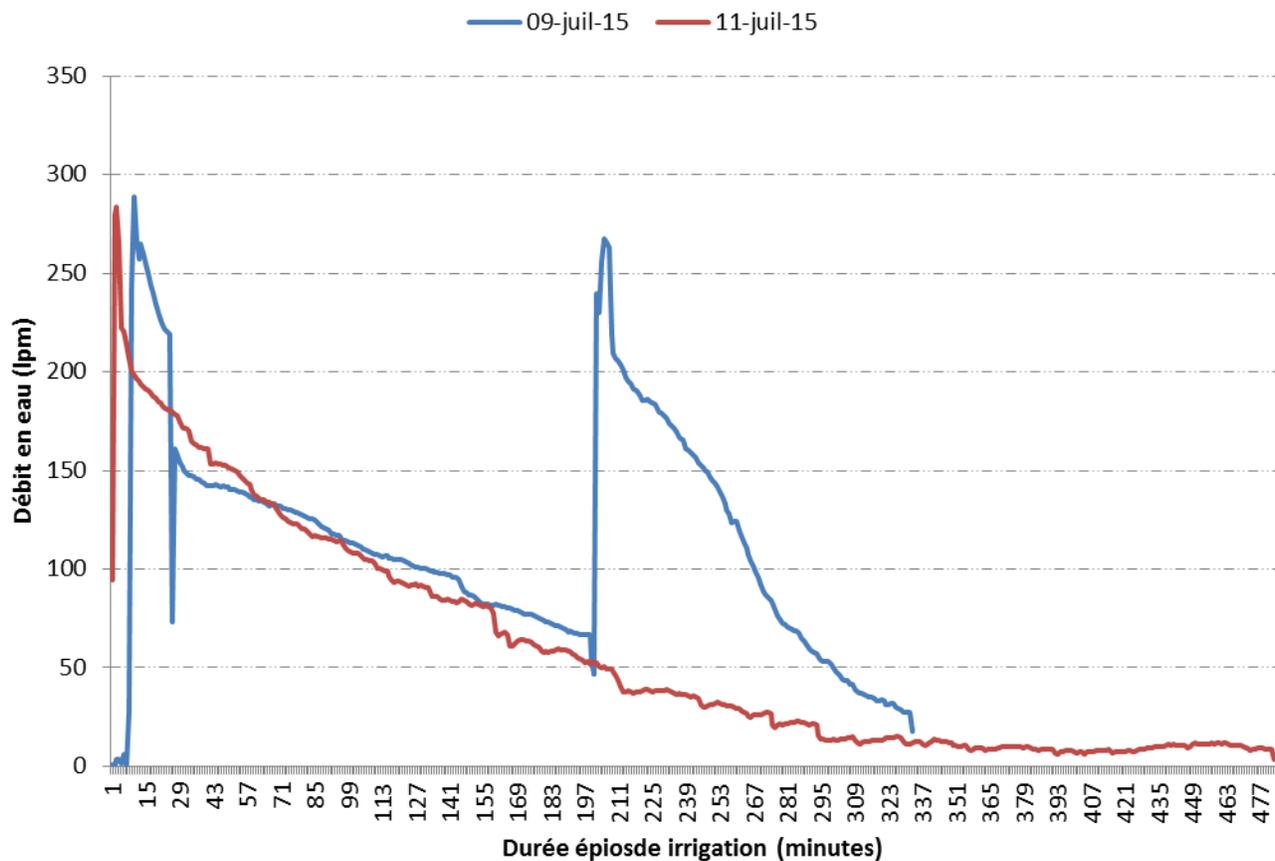


Figure 7. Débit en eau (lpm) affecté par le colmatage du filtre – Site 21, saison 2015.

2.4.4.3 Colmatage du système au fil de la saison

Le colmatage des goutteurs est plutôt problématique, car il est impossible de nettoyer les goutteurs, comparativement au filtre. L'origine de ce colmatage peut être due à différents facteurs biotiques ou non. À moins d'une situation particulière, le colmatage des goutteurs s'observe davantage sur une longue période.

La durée et le volume d'eau utilisé lors des épisodes d'irrigation effectués du 21 mai au 28 septembre 2014 au site 20 ont été mesurés à l'aide d'un débitmètre. Les 68 épisodes sont présentés un à la suite de l'autre à la Figure 8 et le débit par goutteur lors de l'épisode en question. Le débit par goutteur tend à diminuer au fil des épisodes d'irrigation. Cette situation pourrait s'expliquer par le colmatage progressif des goutteurs.

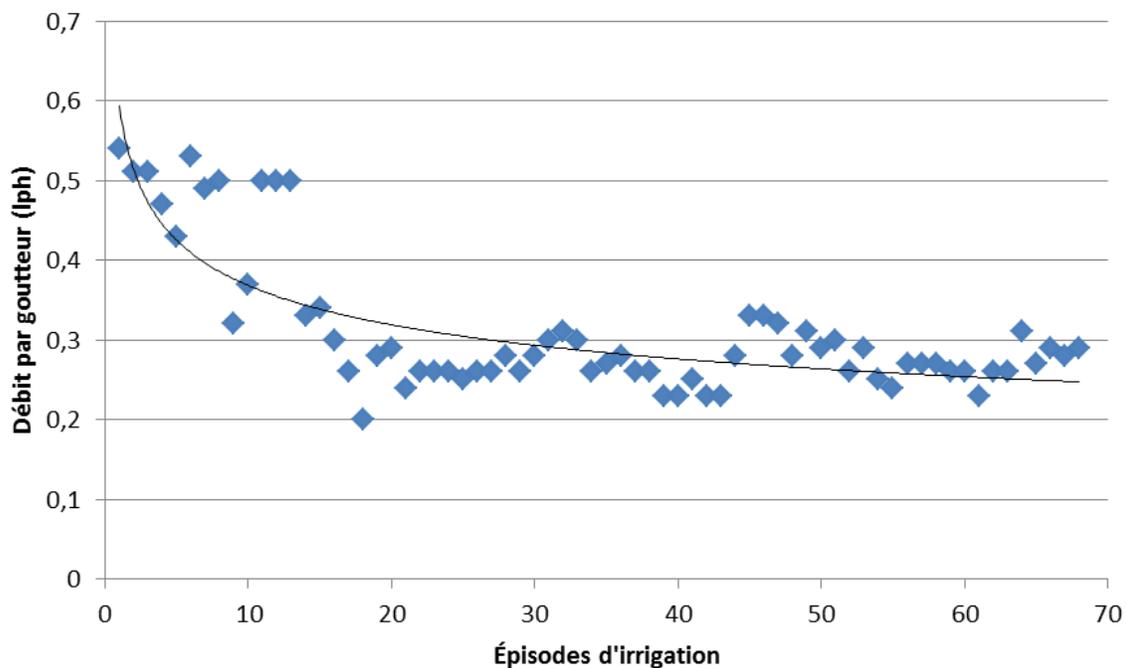
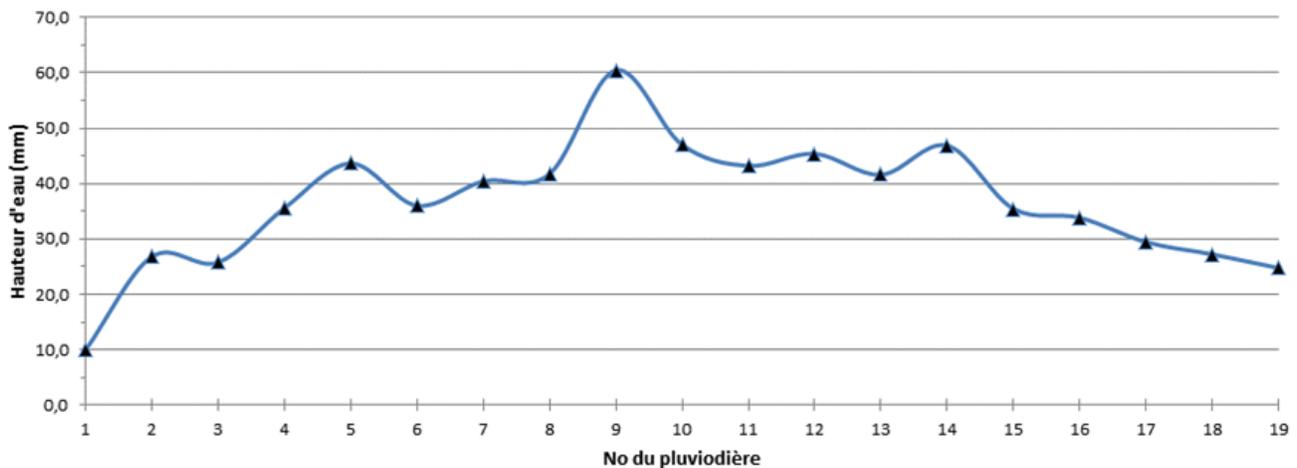


Figure 8. Débit par goutteur (lph) du 1^{er} au 68^e épisode mesuré – Site 20, saison 2014.

2.4.4.4 Uniformité d'application

L'uniformité d'application de l'eau d'un canon avec enrouleur a été mesurée au site 2 à la saison 2014 et les résultats sont présentés à la Figure 9. La largeur considérée pour l'essai a été de 70 m et chacune des valeurs présentes sur le graphique correspond à un point de mesure. Brièvement, les 19 « pluviodières » utilisées pour réaliser l'essai ont reçu en moyenne 37,5 mm, ce qui représente 123 % du volume avancé par la charte théorique du fabricant. Par contre, il y a une grande fluctuation des valeurs entre les différentes stations de mesure. Cette fluctuation exprime un problème d'uniformité d'application du système d'irrigation évalué. Davantage d'information sur cet essai est disponible à l'Annexe 3 du rapport final complet (Boivin et coll., 2016).



Tirée de : Boivin et coll., 2016 (Figure 89)

Figure 9. Profil transversal des hauteurs d'eau recueillies – Site 2, saison 2014.

2.5 Départ, durée et fréquence des apports en eau par l'irrigation

L'appréciation générale du moment où l'irrigation a été déclenchée, de la durée des épisodes et de la fréquence de ces derniers, pour chacun des sites, a été regroupée et est présentée au Tableau 7, selon la saison. Ce tableau est un résumé de ceux présentés dans (Boivin et coll., 2016). Ces résultats indiquent que la plupart du temps, l'irrigation devrait être déclenchée plus tôt, que la durée moyenne d'un épisode est trop longue et que la fréquence des apports est insuffisante.

Durant les trois saisons du suivi, un seul site a utilisé des outils de mesure (tensiomètre). Sans consigne de déclenchement et sans outil pour savoir quand la consigne est atteinte, il est difficile de viser une fréquence adéquate. En absence de contraintes (approvisionnement en eau, coût, etc.) la fréquence devrait être déterminée selon l'atteinte d'une consigne. Par ailleurs, sans outil, le déclenchement de l'irrigation peut aussi être trop hâtif.

La durée d'un épisode d'irrigation peut facilement être déterminée en installant un tensiomètre à la limite inférieure du système racinaire, tout en étant à la portée des irrigations. À partir du moment où le tensiomètre « répond », l'eau appliquée a couvert la zone racinaire et tout apport supplémentaire sera inutilisable par la culture.

Tableau 7. Appréciation du moment pour déclencher, de la durée et de la fréquence d'un épisode d'irrigation en termes de nombre de sites selon la saison.

Saisons	Déclenchement		Durée			Fréquence	
	Adéquat	Tardif	Insuffisante	Adéquate	Excessive	Insuffisante	Adéquate
----- Nombre de sites -----							
2013	1	7		2	8	7	1
2014	7	10	1	4	10	11	6
2015	4	9	1	3	11	11	4
Total	12	26	2	9	29	29	11

2.5.1 Assèchement du sol en périphérie du tube de goutte à goutte

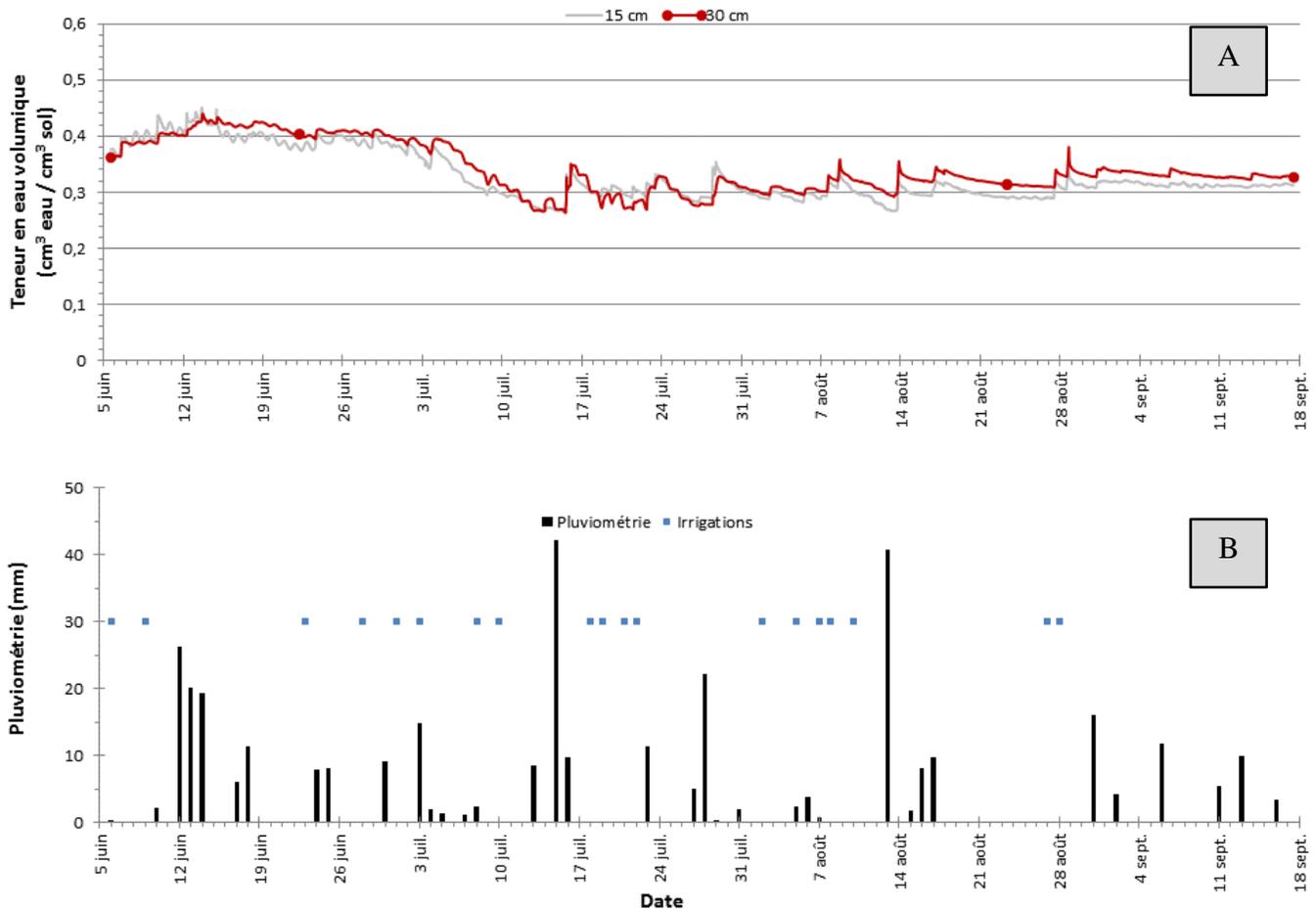
Les sites dont le système cultural est caractérisé par un sol butté recouvert de paillis de plastique et irrigué par goutte à goutte représentent une forte proportion des sites à l'étude. Avec un tel type de système d'irrigation, le nombre de points de contact entre l'apport en eau (goutteurs) et le sol est minime comparativement à un système par aspersion (en l'absence de paillis de plastique). Cette situation n'est pas étrangère à la problématique d'assèchement du sol en périphérie du tube de goutte à goutte.

À ce sujet, un projet réalisé en 2009 et 2010 à l'Île d'Orléans a démontré qu'il peut exister une problématique de répartition de l'eau dans le sol à l'intérieur de la butte, surtout en sol drainant (Boivin et Deschênes, 2011). Pour que le sol de la butte soit bien humidifié, l'eau doit se répartir horizontalement dans cette dernière. Toutefois, les résultats de ce projet ont démontré que l'eau se déplace surtout verticalement en formant un cône d'humectation limité. Conséquemment, une proportion du sol de la butte, en moyenne 50 %, s'assèche. Les éléments nutritifs contenus dans ces zones sont peu valorisés par la culture et risquent d'être lessivés à l'automne lorsque le paillis de plastique sera enlevé

Cette problématique a été observée sur plusieurs sites et un exemple est présenté à la Figure 10. Cette figure présente l'évolution du statut hydrique du sol, les précipitations (mm) et les épisodes d'irrigation mesurés pour le site 7, en 2014. Brièvement, deux sondes TDR (*time domain reflectometry*) ont été utilisées pour mesurer en continu la teneur en eau volumique du sol. Installées à l'horizontale, et ce, à deux profondeurs dans la butte de sol, la valeur générée par ces sondes est une moyenne de la teneur en eau sur une longueur de 30 cm. Si une proportion du sol couvert par la TDR est hors de portée de l'eau provenant du système d'irrigation, cela affectera à la baisse la valeur moyenne.

Les valeurs de teneur en eau obtenues au début de l'été sont plus élevées. Le sol est généralement humide lors de la formation des buttes au printemps et cette humidité se maintient jusqu'à ce que le système racinaire soit suffisamment développé pour aller puiser l'eau présente dans ces zones.

En juin, les valeurs de la teneur en eau du sol sont près de $0,4 \text{ cm}^3 \text{ eau/cm}^3 \text{ sol}$. Au début de juillet, les valeurs observées descendent sous $0,3 \text{ cm}^3 \text{ eau/cm}^3 \text{ sol}$, et ce, malgré les épisodes d'irrigation et les précipitations. Même si la teneur en eau volumique du sol varie par la suite, les valeurs maximales observées en juin ne sont jamais atteintes à nouveau. Un volume de sol hors portée des apports en eau peut expliquer cette situation.

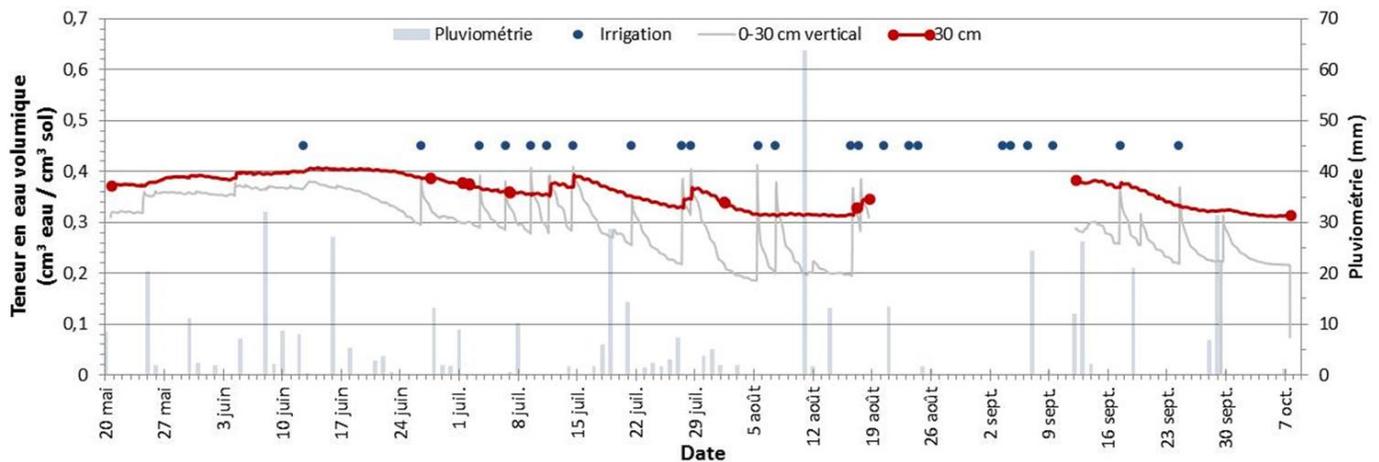


Tirée de : Boivin et coll., 2016 (Figure 25)

Figure 10. Teneur en eau volumique (A), précipitations et épisodes d'irrigation (B) - Site 7, saison 2014.

2.5.1.1 Détournement des précipitations par le paillis de plastique

L'assèchement du sol en périphérie du tube de goutte à goutte est une problématique qui est accentuée par le détournement des précipitations par le paillis de plastique. Un tel exemple est présenté à la Figure 11 où l'évolution de la teneur en eau volumique, les précipitations et les épisodes d'irrigation, mesurés au site 18 en 2015, y sont présentés. La courbe grise correspond aux lectures de la sonde TDR qui a été insérée, cette fois-là, à la verticale afin de suivre l'évolution de la teneur en eau volumique dans les 30 premiers cm de sol. Les pics observés vont de pair avec les épisodes d'irrigation identifiés avec un point bleu. De tels pics ne s'observent pas lors d'un événement de pluie.



Tiré de : Boivin et coll., 2016 (Figure 59)

Figure 11. Teneur en eau volumique, précipitations et épisodes d'irrigation - Site 18, saison 2015.

La durée de 12 épisodes d'irrigation est présentée au Tableau 8. Ces épisodes sont aussi représentés avec des points bleus à la Figure 11. Cette dernière a été utilisée pour vérifier si la durée de l'épisode d'irrigation, à la teneur eau du sol au moment du déclenchement, a été suffisante pour atteindre la limite inférieure du système racinaire (Sonde TDR placée à 30 cm de profondeur, courbe rouge avec points).

Par exemple, les épisodes du 26 juin, 3, 6 et 9 juillet ne sont pas perçus par la sonde TDR placée à l'horizontale et située à 30 cm. Toutefois, celle qui est à la verticale et qui couvre les 30 premiers cm de sol, répond en indiquant une augmentation de la teneur en eau volumique. Les durées sont alors près de 100 minutes. Il faut attendre les épisodes du 11 et 14 juillet avant que la sonde TDR à 30 cm de profondeur réponde et la durée de ces épisodes a été respectivement de 270 et 319 minutes.

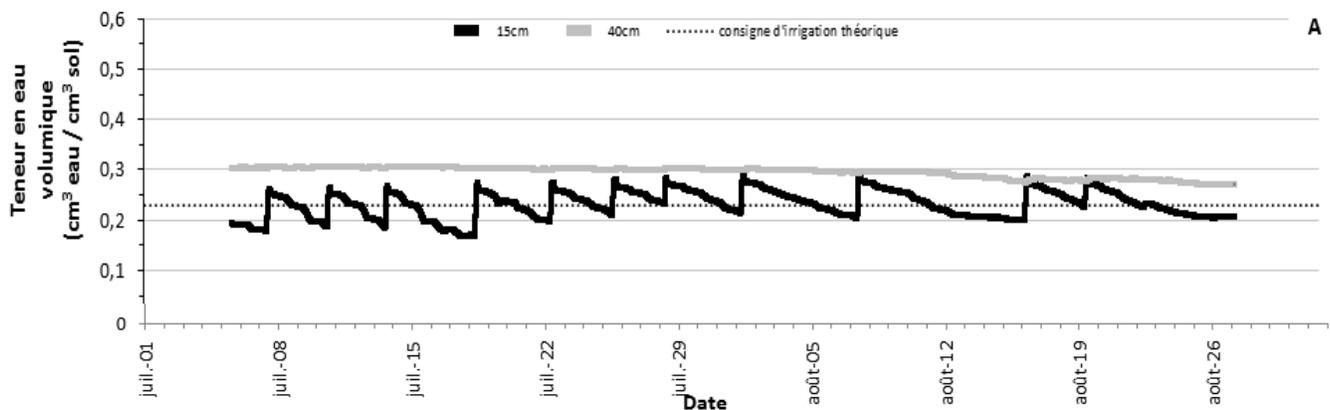
La durée visée d'un épisode pour ce site était de 96 minutes en 2015 (Figure 4). Alors, pourquoi cette sonde ne répond pas lors des épisodes du 26 juin, 3, 6 et 9 juillet? Ces épisodes ont été déclenchés « tardivement ». La teneur en eau du sol était alors inférieure au seuil ciblé pour le déclenchement. Conséquemment, la capacité de rétention en eau du sol était plus élevée. Le 12 juin et le 17 septembre, la sonde à 30 cm de profondeur réponde, et la courbe rouge indique que le déclenchement a été fait dans des conditions de sol plus humides, plus près du seuil où le déclenchement devrait avoir lieu.

Tableau 8. Durée des épisodes d'irrigation et réponse de la sonde TDR placée à 30 cm de profondeur - Site 18, 2015.

Date épisode irrigation	Durée de l'épisode (minutes)	Réponse sonde TDR 30 cm (Oui/Non)
12 juin	100	Oui
26 juin	100	Non
3 juillet	71	Non
6 juillet	94	Non
9 juillet	112	Non
11 juillet	270	Oui
14 juillet	319	Oui
21 juillet	78	Non
5 août	124	Non
7 août	209	Non
17 septembre	132	Oui
24 septembre	116	Non

2.5.2 Indicateurs de compaction

L'absence de réponse de la sonde TDR en profondeur (40 cm, placée à l'horizontale) peut aussi indiquer un problème de compaction. Onze épisodes d'irrigation (pointes dans la courbe en noir) sont présentés à la Figure 12. La durée de ces épisodes était en moyenne de 304 minutes (Figure 1). Alors que la sonde TDR placée à 15 cm (installée à l'horizontale) répond, en indiquant une augmentation de la teneur en eau volumique du sol, celle à 40 cm ne perçoit aucun changement dans la teneur en eau du sol. De plus, la densité apparente du sol à cette profondeur était de $1,78 \text{ g/cm}^3$ (Boivin et coll., 2016). Cette valeur est considérée comme élevée.



Tiré de : Boivin et coll., 2016 (Figure 33)

Figure 12. Indicateur de compaction par l'absence de réponse de la sonde TDR en profondeur – Site 10, en 2013.

3 Économies d'eau

3.1 Économie d'eau par épisode

Pour chacun des sites, où les informations le permettent, l'apport ciblé en eau (Tableaux 1 à 5) a été comparé avec le volume moyen d'eau mesuré par épisode d'irrigation. L'écart entre les deux volumes est présenté à la Figure 13 (sites irrigués par goutte à goutte) et à la Figure 14 (sites irrigués par aspersion).

Un écart négatif indique que le volume moyen apporté lors d'un épisode d'irrigation est inférieur au volume cible. Un écart positif indique que le volume moyen appliqué par épisode dépasse le volume établi pour ce site.

Donc, pour les sites suivis en sols organiques (1 à 6), il n'y a pas d'économie possible par épisode d'irrigation, ni pour les deux sites en sols minéraux irrigués par aspersion (23 et 24). Toutefois, pour les autres sites, irrigués par goutte à goutte, des économies d'eau par épisode pourraient être réalisées.

Par ailleurs, le volume moyen en eau qui est appliqué en trop représente un risque de perte des éléments nutritifs par lessivage.

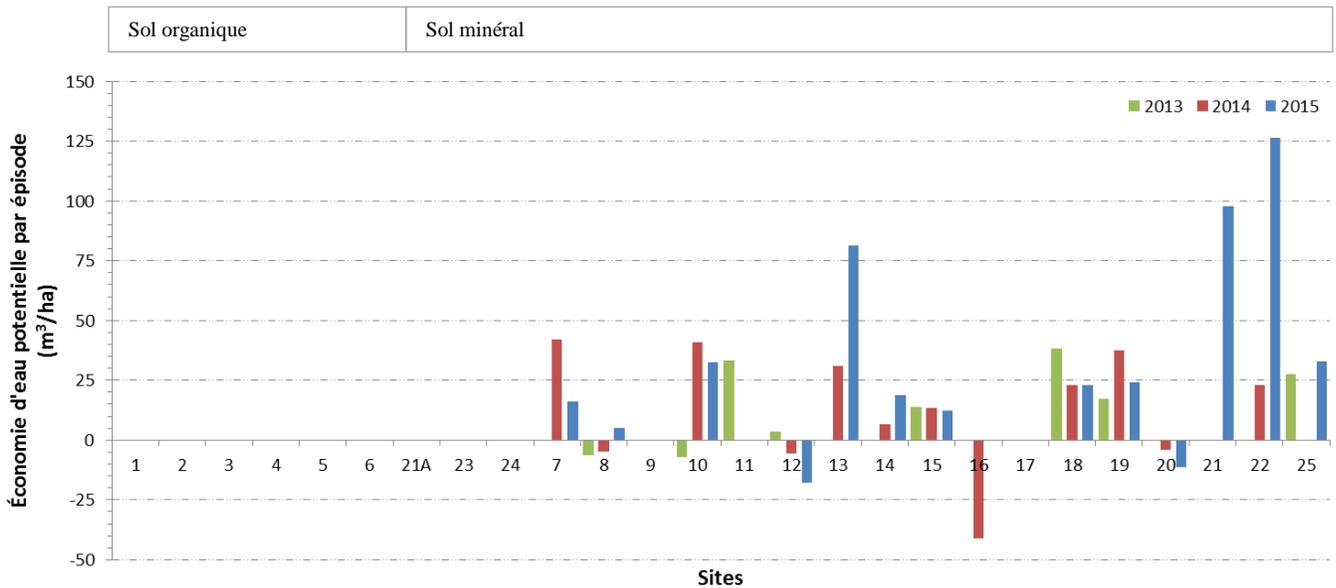


Figure 13. Économie d'eau potentielle moyenne par épisode (m³/ha) selon le site et la saison – Gag.

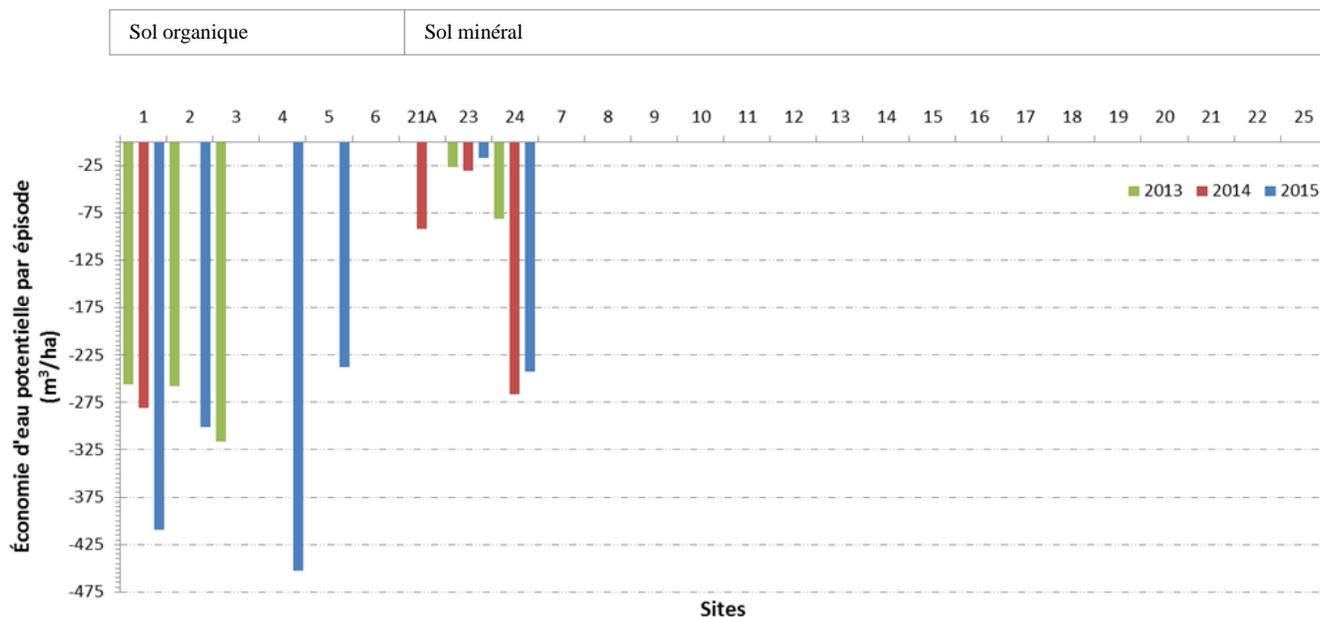


Figure 14. Économie d’eau potentielle moyenne par épisode (m³/ha) selon le site et la saison – Aspersion.

3.2 Économie d’eau à l’échelle de la saison

Maintenant, s’il est relativement simple de conclure qu’il y a des économies d’eau à réaliser par épisode (sites en goutte à goutte), il est plus hasardeux de se prononcer à l’échelle de la saison. Les résultats présentés au Tableau 7 indiquent que la plupart du temps, l’irrigation devrait être déclenchée plus tôt, que la durée moyenne d’un épisode est trop longue et que la fréquence des apports est insuffisante. Certes la fréquence devrait être augmentée, mais elle demeure dépendante de l’évolution du statut hydrique du sol, qui lui dépend des prélèvements de la culture, des précipitations et aussi du système cultural.

Axes d'optimisation de l'usage de l'eau d'irrigation

4 Adoption d'une régie raisonnée de l'irrigation

L'adoption d'une régie raisonnée de l'irrigation s'avère fort probablement le meilleur choix. Une telle régie repose sur l'identification d'une consigne de déclenchement qui rejoint un optimal agronomique, environnemental et économique.

4.1 Les objectifs de l'irrigation

Il est important d'identifier les objectifs qui sont poursuivis par l'irrigation. Il peut s'agir d'une assurance récolte où l'on intervient afin d'assurer la survie de la plante. L'objectif peut aussi être d'augmenter le rendement vendable en ciblant une meilleure qualité du produit. Enfin, diminuer les risques pour l'environnement (ex. lessivage de l'azote) devrait aussi être une préoccupation.

4.2 Caractérisation des propriétés physiques du sol

La caractérisation des propriétés physiques du sol est l'une des premières étapes à réaliser. L'aboutissement de cette étape mènera à l'identification d'une consigne de déclenchement de l'irrigation et aussi à une dose d'irrigation, si la profondeur d'enracinement est connue. Par la suite, cette consigne devra être confrontée avec les autres facteurs à considérer. Par exemple, selon les objectifs, le volume d'eau disponible pour l'irrigation et la valeur monétaire de la culture, le seuil de déclenchement de l'irrigation pourrait être revu.

4.3 Utiliser des outils

Inutile d'investir des ressources à déterminer une consigne, si aucun outil n'est utilisé pour vérifier le moment où cette consigne est atteinte, surtout dans un contexte comme au Québec, où les conditions météorologiques peuvent être très différentes d'une journée à l'autre. Aussi, selon le système cultural et également les objectifs poursuivis par l'irrigation, divers outils peuvent être efficace pour gérer les apports eau par l'irrigation. Le tensiomètre et le bilan hydrique en sont des exemples et même l'approche dite « hybride » où les forces des deux méthodes sont mises en commun (Vallée et coll., 2014).

De plus, si les outils sont efficaces pour cibler ou anticiper le moment où il faudra déclencher une irrigation, ils sont également utiles pour déterminer la durée d'un épisode. Par exemple, le temps qui s'écoule entre le moment où le système d'irrigation est mis en marche, pleinement chargé, et le moment où le tensiomètre, placé à la limite inférieure du système racinaire, « répond », ce temps correspond à ce que devrait être la durée d'un épisode. Cette technique, relativement simple à mettre en pratique, a fait l'objet d'essais et de réflexions qui ont été présentés lors de colloques et de journée d'information (Bergeron, 2001; Bergeron, 2004 et Bergeron et Boivin, 2005). À elle seule, cette technique permettrait de réduire la durée des épisodes d'irrigation observée dans le cadre de ce projet et cela se traduirait par une grande économie d'eau par évènement.

4.4 Complexe et relève du service-conseil

Depuis la fin des années 1990, plusieurs projets de recherche et d'innovation qui ont trait à la gestion de l'irrigation ont été réalisés au Québec. De plus, plusieurs conférences, rapports de recherche et mémoires de maîtrise ou thèses de doctorat ont été publiés et ont permis l'avancement des connaissances sur le sujet. Ces projets ont démontré l'importance et les bénéfices d'une régie raisonnée de l'irrigation. Cependant, cette expertise est peu accessible pour la majorité des producteurs.

Les producteurs agricoles du Québec ont accès à un excellent support en fertilisation et en gestion phytosanitaire, mais l'accessibilité à l'expertise pour la gestion de l'irrigation est plus difficile. Toutefois, si certaines actions sont relativement simples à poser, c'est la nécessité d'intégrer l'ensemble des facteurs de raisonnement qui oriente la démarche vers le service-conseil (Boivin et Bergeron, 2015).

Références bibliographiques

- Bergeron, D., 2001. Réflexion sur la régie de l'irrigation goutte à goutte. Conférence prononcée lors de la Semaine Horticole le 8 février. Conseil Québécois de l'horticulture. 3 p.
- Bergeron, D., 2004. Outils de régie de l'irrigation. Conférence prononcée lors des Journées horticoles des Laurentides le 21 janvier. MAPAQ, région les Laurentides.
- Bergeron, D. et C. Boivin. 2005. Mieux irriguer avec les tensiomètres. Conférence prononcée lors des Journées horticoles régionales de St-Rémi le 8 décembre 2005. [En ligne], <https://www.agrireseau.net/pdt/documents/Tensiometre.pdf>
- Boivin, C. et P. Deschênes. 2011. Stratégies d'irrigation dans la fraise à jours neutres. Rapport final déposé au CDAQ. IRDA. 98 p. [En ligne], http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/boivin-deschenes-2011_rapport_strategies_irrigation_fraise.pdf
- Boivin, C. et D. Bergeron. 2015. Pourquoi pas un service-conseil en irrigation? Conférence prononcée lors du Colloque sur la pomme de terre le 20 novembre. CRAAQ. [En ligne], https://www.craaq.qc.ca/documents/files/EPDT1501/MC05_Boivin_Carl.pdf
- Boivin, C., J. Vallée, P. Dechênes, M. Guillou et D. Bergeron. 2016. Caractérisation de l'usage de l'eau en irrigation. Rapport final remis au MAPAQ. IRDA. 229 p. [En ligne], <https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/92075?statut=1&page=1>
- FAO. 2016. AQUASTAT, Données statistiques Canada. [En ligne], <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/irrigationmap/CAN/index.stm>
- ISQ et MAPAQ. 2014. Profil sectoriel de l'industrie horticole au Québec. [En ligne], <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/profil-industrie-horticole.html>
- Nadon, S., D. Bergeron, C. Boivin et J. Vallée. 2016. Création et validation d'un feuillet technique sur la performance de systèmes d'irrigation par aspersion et par goutte à goutte en champ. Rapport final remis au RLIO. IRDA. 59 p. [En ligne], http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/nadons_2016_diagnosticirrigation_rr.pdf
- Vallée, J., C. Boivin, D. Bergeron, R. Audet et F. Chrétien. 2014. Comparaison et évaluation d'outils de gestion de l'irrigation. Rapport final remis au CDAQ. IRDA, 74 p. [En ligne], http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/vallee-et-al-2014_rapport_outils_gestion_irrigation.pdf