

FORMATION

GESTION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE L'EAU DANS LES CULTURES



Carl Boivin, agr., M.Sc. - IRDA
Paul Deschênes, agr., M.Sc. - IRDA
Jérémie Vallée, agr., B.Sc. - IRDA

Daniel Bergeron, agr., M.Sc. - DRCN du MAPAQ
Caroline Côté, agr., Ph.D. - IRDA

Complexe scientifique, Québec le 22 janvier 2018

Plateforme d'innovation en agriculture biologique, Saint-Bruno-de-Montarville le 1^{er} février 2018

Équipe de réalisation

Carl Boivin, IRDA

Paul Deschênes, IRDA

Jérémie Vallée, IRDA

Daniel Bergeron, DRCN du MAPAQ

Caroline Côté, IRDA

Antoine Lamontagne, IRDA

Mathieu Bilodeau, IRDA

Tommy Bernier, IRDA

Remerciements

Mikaël Guillou, DPA du MAPAQ

Lucie Caron, DRL du MAPAQ

Isabelle Couture, DRM du MAPAQ

Ferme Maurice et Philippe Vaillancourt

Ferme Victorin Drolet

Équipe régie de l'eau

Expertise IRDA-MAPAQ DRCN

Irrigation raisonnée

Caractérisation du sol et des mouvements d'eau

Interactions irrigation, fertigation et fertilisation

Diagnostic de système d'irrigation

Efficacité d'utilisation de l'eau

Consigne d'irrigation

Suivi météorologique

Coefficients culturaux

Bilan hydrique



Équipe régie de l'eau

Cultures

Petits fruits

Arbres fruitiers

Pommes de terre

Productions maraîchères

Systèmes d'irrigation

Goutte à goutte

Piquets goutteur

Gicleurs

Canon

Pivot

Rampe



Équipe hygiène de l'environnement agricole

- Salubrité des fruits et légumes
- Qualité de l'eau
- Gestion des engrais de ferme
- Voie environnementale de transfert des contaminants microbiens



Ce projet a été réalisé grâce à une aide financière du Programme d'appui à l'offre de services-conseils (PAOSCA), issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir 2 conclu entre le MAPAQ et AAC.

Plan de la formation

- Mise en contexte et présentation des formateurs
- Introduction
- Objectifs de l'irrigation
- Ressources
- Gestion de l'irrigation
- Performance d'un système d'irrigation
- Présentation du feuillet « Évaluation globale de la situation de l'entreprise »
- Évaluation de la formation

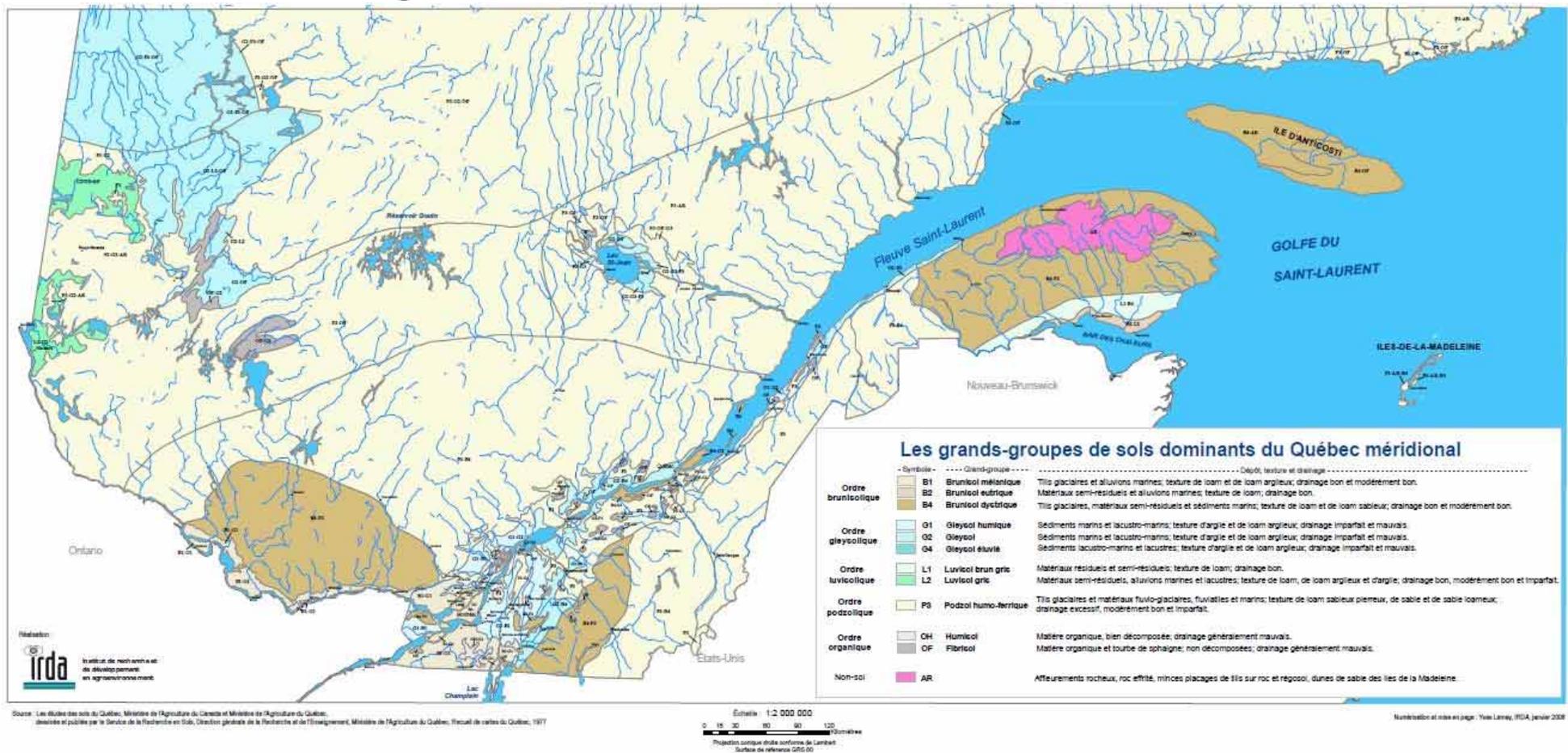
Introduction

- État de la situation au Québec
 - Les cultures potentiellement irrigables
 - Maraîchères
 - Fruitières
 - Pommes de terre
 - Arbres fruitiers
 - Horticulture ornementale



État de la situation au Québec

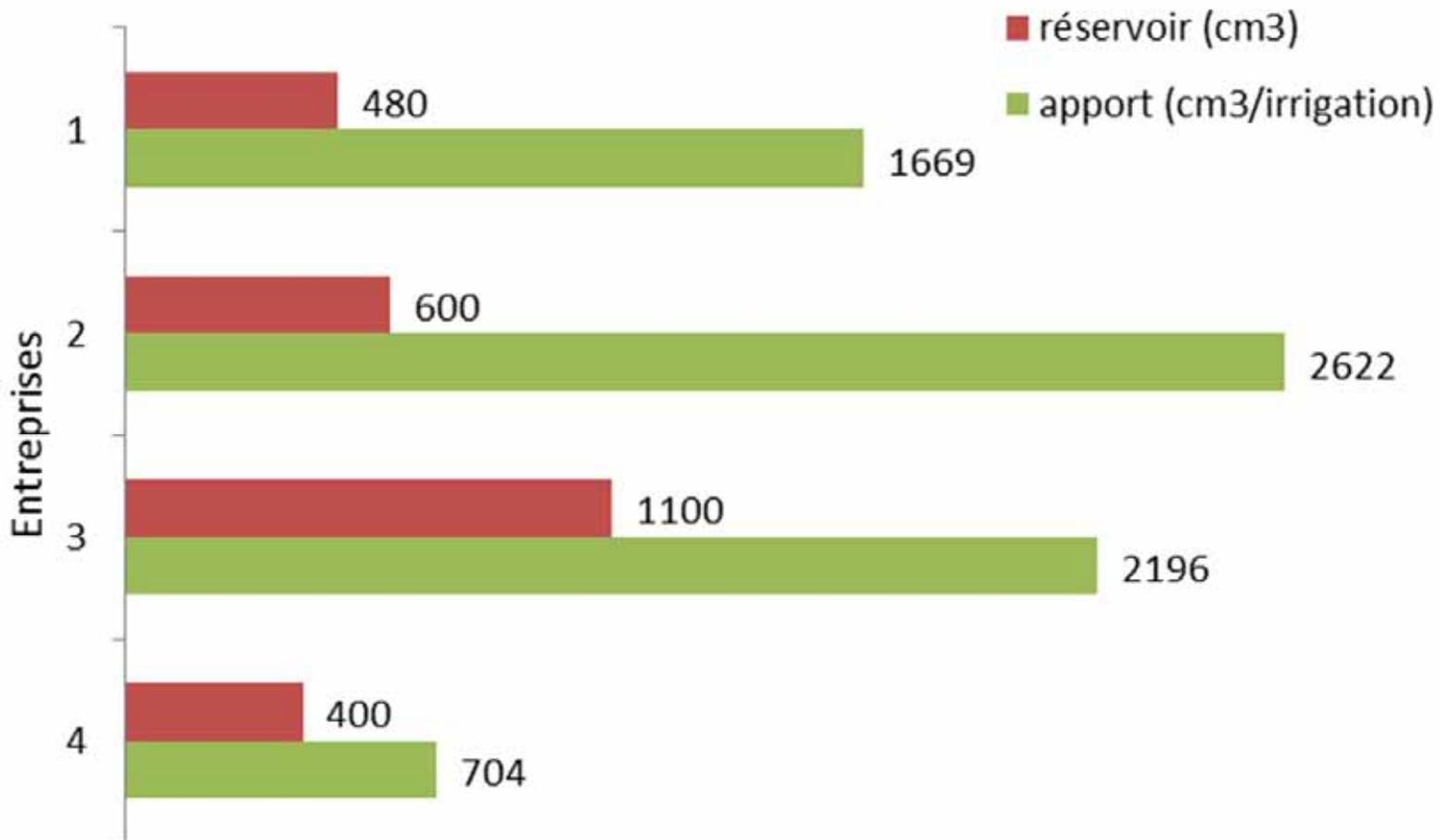
- Le sol: un réservoir d'eau
- Contexte régional



- Gestion de l'irrigation par l'expérience, les habitudes et les contraintes
 - Au toucher
 - Selon les précipitations
 - « Le pouce d'eau par semaine »
 - Irriguer jusqu'à ce que la pompe manque d'essence
 - ...
 - Méthodes qualitatives



- Épisodes d'irrigation trop longs et fréquences trop faibles entre les épisodes



- Forte absence d'outils de gestion de l'irrigation chez les producteurs



- Peu d'expertise en gestion raisonnée de l'irrigation auprès des producteurs
- Dans les dernières années, notions d'irrigations peu présentes dans la formation des conseillers agricoles
 - Conditions différentes pour les domaines de la fertilité des sols, de la phytoprotection et de la malherbologie
 - Impact sur l'offre de services aux producteurs

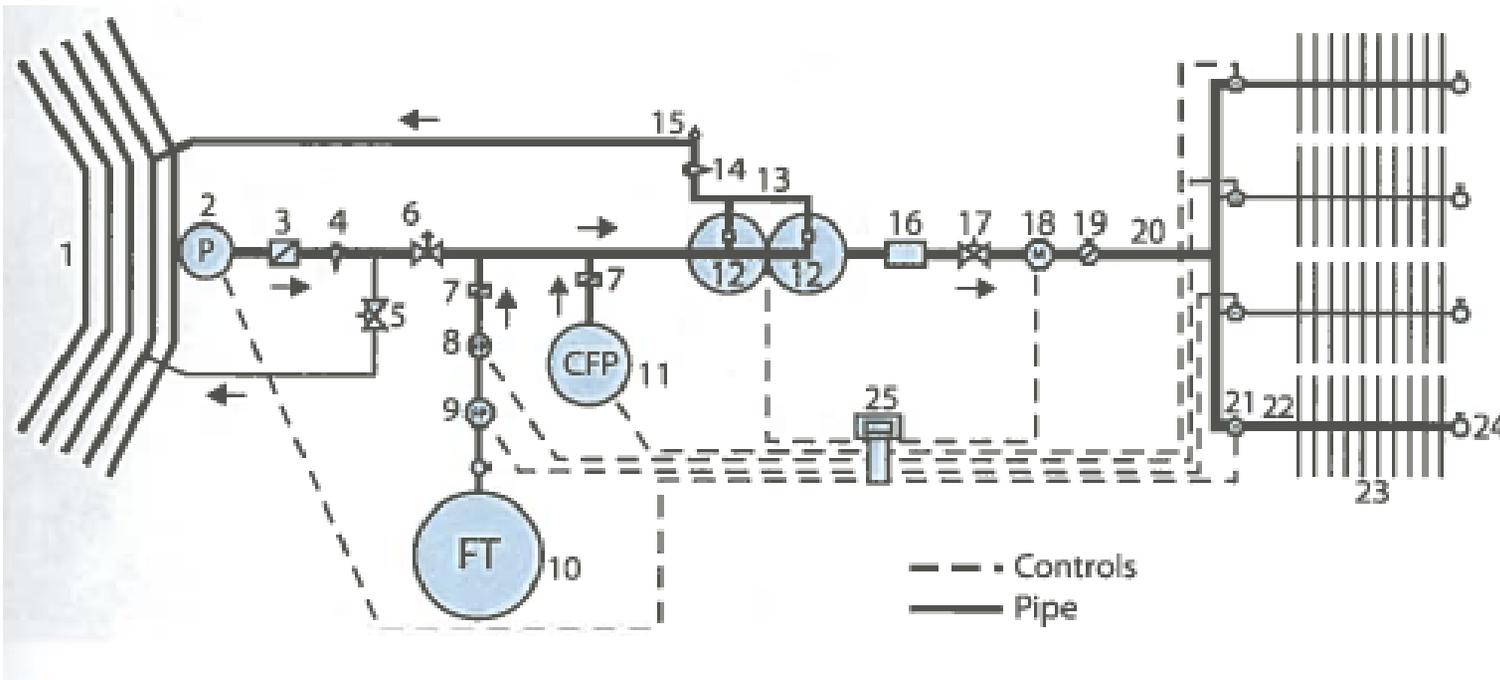


Principaux systèmes au Québec

- Composantes
- Systèmes mobiles
- Systèmes fixes



Principales composantes



1. Source d'eau
2. Pompe
5. Valve de retour d'eau
7. Injecteur d'engrais
10. Réservoir de fertilisant
12. Filtre
17. Régulateur de pression
18. Débitmètre
20. Conduite principale
21. Valve
22. Conduite secondaire
23. Goutte à goutte
24. Valve de purge
25. Contrôleur

Stetson et Mecham. 2011

Prise d'eau

- Crépine
- Position de la prise d'eau dans la colonne d'eau



Pompe



Filtre

- Colmatage
- Fertigation



Régulateur de pression

- Pression d'opération
- Apport d'eau constant
- Évite les bris



Manomètre

- Inspection, ponctuelle ou permanente
- Fuite, temps de chargement



Valve

- Gestion par section
- Purge



Débitmètre

- Chargement, volume, durée, colmatage



- Dans quels ordre et sens l'eau du système traverse ces composantes?



- Pompe (tuyau suction et tuyau flexible)
- Filtre (après injection d'engrais)
- Débitmètre
- Régulateur (dernier avant points de sortie d'eau)
- Valve de purge



Systemes mobiles

- Canon enrouleur



Canon enrouleur

- Scénario économique

Composantes	Coûts (\$)*
Enrouleur (tuyau 400 m)	44 000
Compresseur de vidange	3 000
Pompe sur tracteur	4 800
Tuyau, panier de succion et raccordement	1 300
Tuyaux d'alimentation	9 600
TOTAL	62 700
DIRTA	7 912
Tracteur Déplacement (15 h x 50 \$/h***)	750
Tracteur Pompage (375 h x 20 \$/h***)	7 500
TOTAL	8 250
Main d'œuvre (33 h x 15 \$/h)	495
Carburant (375 h x 12 litres/h x 1,02 \$/litre****)	4 590

* Transport non compris, adapté de Bergeron et Bouchard (2015)



Superficie par canon : 25 ha
Capacité du canon : 3h/ha
Tracteur pour déplacement : 15 h
Tracteur pour pompage : 375 h
Main d'œuvre : 33 h
Consommation carburant : 12 litres/h

DIRTA: Dépréciation (D), intérêts (I), réparations et entretien (R), taxes foncières (T) et assurances (A)

Contextes favorables

- Volume d'eau disponible : Non contraignant
- Fréquence des irrigations : Modérée

Contextes défavorables

- Volume d'eau disponible : Contraignant
- Fréquence des irrigations : Élevée
- Champ sans « recoupage » possible
- Plusieurs champs à fréquence élevée à couvrir avec le même équipement

Avantages

- Exigence de filtration de l'eau : Faible
- Besoin main d'œuvre : Modéré
- Durée de vie : Long terme

Inconvénients

- Coût d'acquisition
- Uniformité très affectée par le vent
- Besoin en énergie : Élevé

Retrouvé dans quelles culture?

- Pomme de terre, légumes en général

Rampe enrouleur



Rampe avec enrouleur

- Scénario économique

Composantes	Coûts
Enrouleur et rampe (tuyau 400 m)	82 000
Compresseur de vidange	3 000
Pompe sur tracteur	4 800
Tuyau, panier de succion et raccordement	1 300
Tuyau d'alimentation	9 600
TOTAL	100 700
DIRTA	12 708
Tracteur Déplacement (30 h x 50 \$/h)	1 500
Tracteur Pompage (375 h x 20 \$/h)	7 500
TOTAL	9 000
Main d'œuvre (83 h x 15 \$/h)	1 245
Carburant (375 h x 7 litres/h x 1,02 \$/litre)	2 677

Superficie par rampe : 25 ha
Capacité de la rampe : 3h/ha
Tracteur pour déplacement : 30 h
Tracteur pour pompage : 375 h
Main d'œuvre : 83 h
Consommation carburant : 7 litres/h

* Transport non compris, adapté de Bergeron et Bouchard (2015)

Contextes favorables

- Volume d'eau disponible : Non contraignant
- Fréquence des irrigations : Modérée
- Champ nivelé (sous les roues)

Contextes défavorables

- Fréquence des irrigations : Élevée
- Champ sans « recoupage » possible
- Plusieurs champs à fréquence élevée à couvrir avec le même équipement

Avantages

- Fertigation : Possible
- Besoin énergie : Faible
- Exigence de filtration de l'eau : Faible
- Durée de vie : Long terme

Inconvénients

- Coût d'acquisition
- Uniformité affectée par le vent
- Besoin main d'œuvre : Élevé
- Surveillance

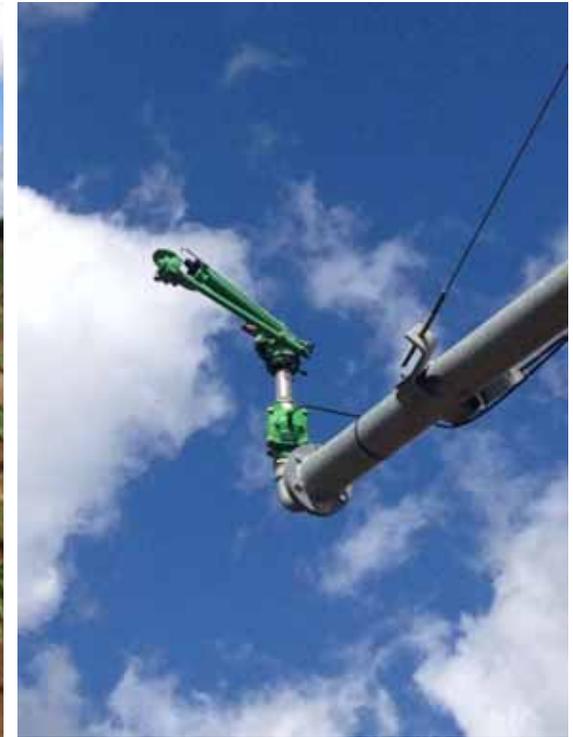
Retrouvé dans quelles cultures?

- Pomme de terre, légumes



Systemes fixes

- Pivot central



Pivot central

- Scénario économique

Composantes	Coûts
Pivot installé	115 000
Pompe diésel	30 000
Tuyau, panier de suction et raccordement	1 300
Tuyau d'alimentation HDPE fusionné et enfoui	18 150
TOTAL	164 450
DIRTA	20 754
Main d'œuvre (20 h x 15 \$/h)	300
Carburant (200 h x 7 litres/h x 1,02 \$/litre)	1 428

* Transport non compris, adapté de Bergeron et Bouchard (2015)



Pivot fixe

1 an sur 2 irrigué en raison des rotations

Superficie par pivot : 23 ha

Capacité du pivot : 1,75h/ha

Main d'œuvre : 20 h

Pompage : 200 h

Consommation carburant : 7 litres/h

Pivot central

Contextes favorables

- Volume d'eau disponible : Non contraignant
- Fréquence des irrigations : Élevée
- Grande superficie
- Culture de rotation irriguée

Contextes défavorables

- Volume d'eau disponible : Contraignant
- Fréquence des irrigations : Faible
- Champ longitudinal

Avantages

- Uniformité d'application
- Besoin énergie : Faible
- Exigence de filtration de l'eau : Faible
- Besoin main d'œuvre : Faible
- Durée de vie : Long terme

Inconvénients

- Coût d'acquisition
- Couverture du champ : Circulaire
- Uniformité peut être affectée par le vent

Retrouvé dans quelles cultures?

- Pomme de terre

Gicleurs/canon avec tuyaux d'aluminium



Contextes favorables

- Volume d'eau disponible : Non contraignant
- Fréquence des irrigations : Modérée

Contextes défavorables

- Fréquence des irrigations : Élevée
- Champ sans « recoupage » possible
- Plusieurs champs à fréquence élevée à couvrir avec le même équipement

Avantages

- Exigence de filtration de l'eau : Faible
- Coût d'acquisition
- Durée de vie : Long terme

Inconvénients

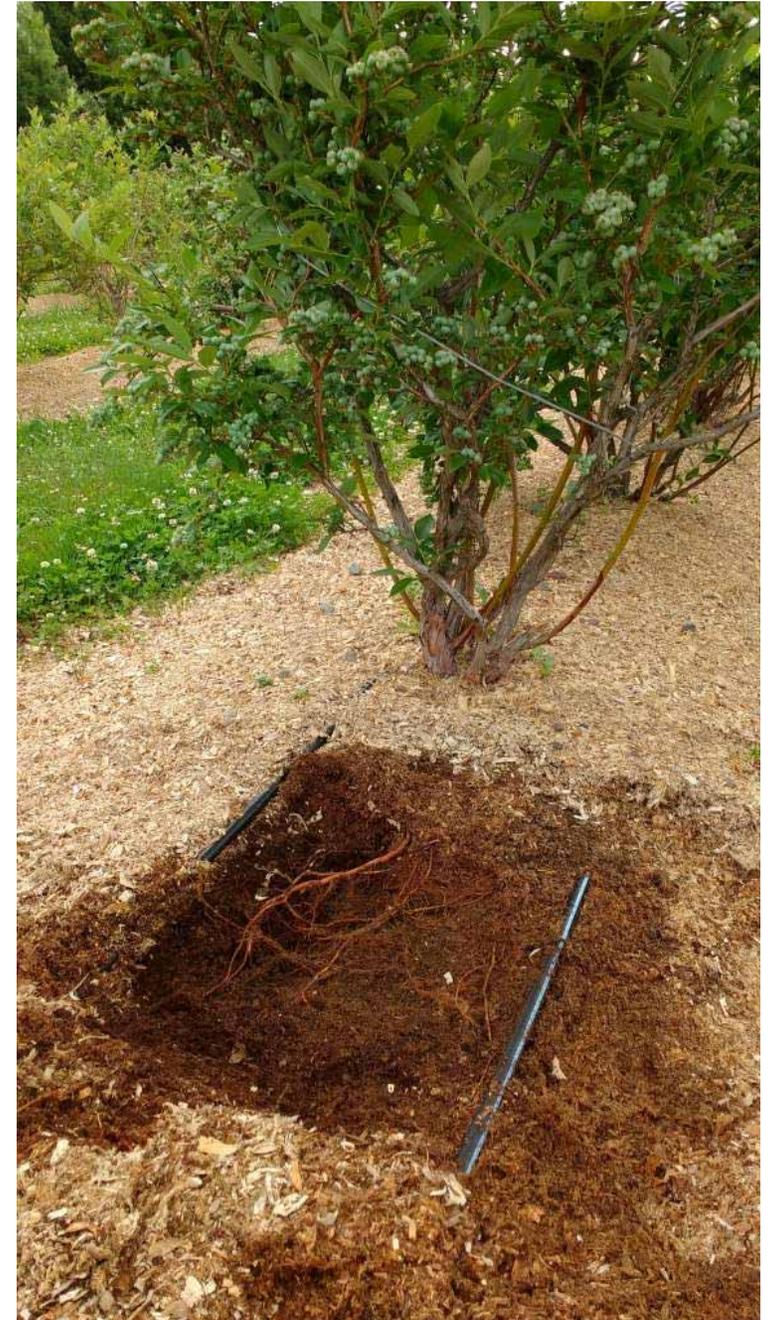
- Besoin énergie : Modéré à élevé
- Uniformité affectée par le vent
- Besoin main d'œuvre : Élevé

Retrouvé dans quelles cultures?

- Légumes, pommes de terre, petits fruits



Goutte à goutte



Goutte à goutte

- Scénario économique

Distance eau-champ: 333 m

Pompe 11 CV: 2 ha à la fois

Matériel: Filtre, injecteur engrais, tuyau succion, régulateur pression

Tubulure: 6 millième de pouce d'épaisseur, renouvelée chaque année

	Coûts/ha
DIRTA	411
Coût annuel d'exploitation	690
Coût total annuel	1101

Adapté de Vallée et coll. (2017)

Goutte à goutte

Contextes favorables

- Volume d'eau disponible : Contraignant
- Fréquence des irrigations : Élevée
- Grande superficie

Contextes défavorables

- Forte pente : uniformité d'application
- Volume d'eau disponible : Contraignant
- Fréquence des irrigations : Faible
- Champ longitudinal

Avantages

- Uniformité d'application
- Besoin énergie : Faible
- Ne mouille par le feuillage
- N'empêche pas les opérations culturale lors d'une irrigation

Inconvénients

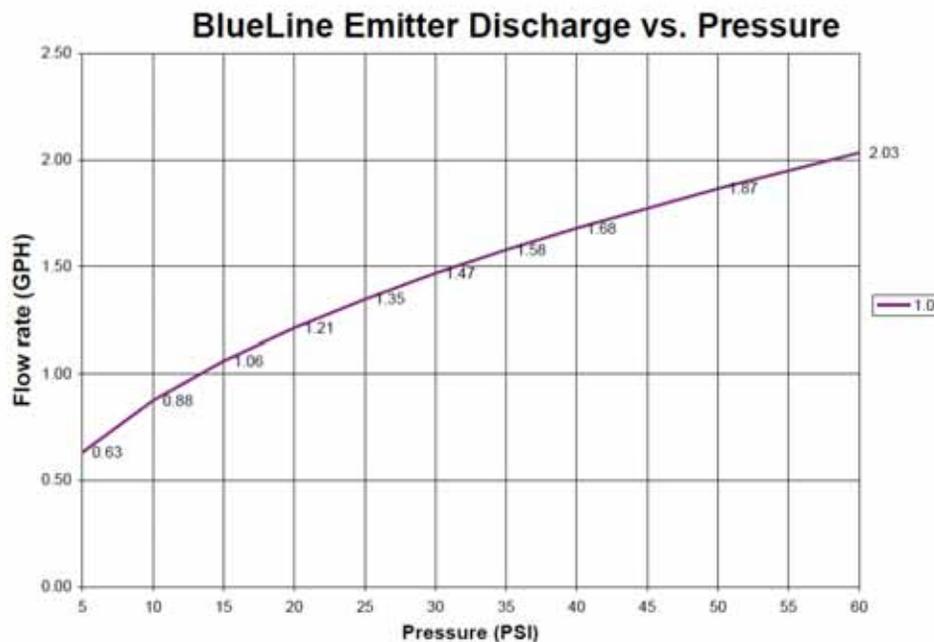
- Exigence de filtration de l'eau : Élevée
- Coût d'acquisition (renouvellement annuel)
- Faible hauteur d'eau par apport
- Coût pour enlever et s'en départir
- Durée de vie : Court terme
- Sol léger : distribution latérale de l'eau limitée
- Vulnérable aux bris mécaniques

Retrouvé dans quelles cultures?

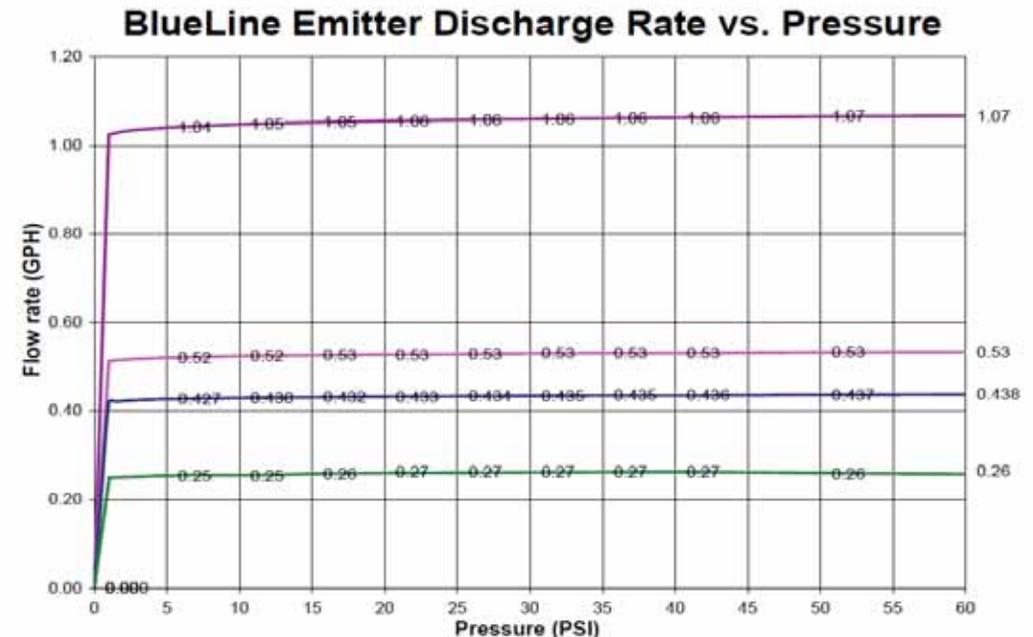
- Culture fruitières et maraîchères

Goutte à goutte

- Annuel (cultures maraîchères, fraises)
- Permanent (arbres fruitiers, bleuets en corymbe)
- Compensateur de pression (PC)



<https://www.toro.com/en/agriculture/irrigation-drip-tape-dripline/blueline-classic>



<https://www.toro.com/en/agriculture/irrigation-drip-tape-dripline/blueline-pc>

Goutte à goutte

- AquaTraxx (exposant 0,5) 275 \$ / 10 000'
- AquaTraxx FC (exposant 0,3) 320 \$ / 10 000'
- BlueLine PC (pressure compensator) 160 \$ / 1000'

<http://www.duboisag.com/fr>

Autres systèmes d'irrigation

- Petites superficies
- Productions diversifiées



Photo:Équiterre. 2009

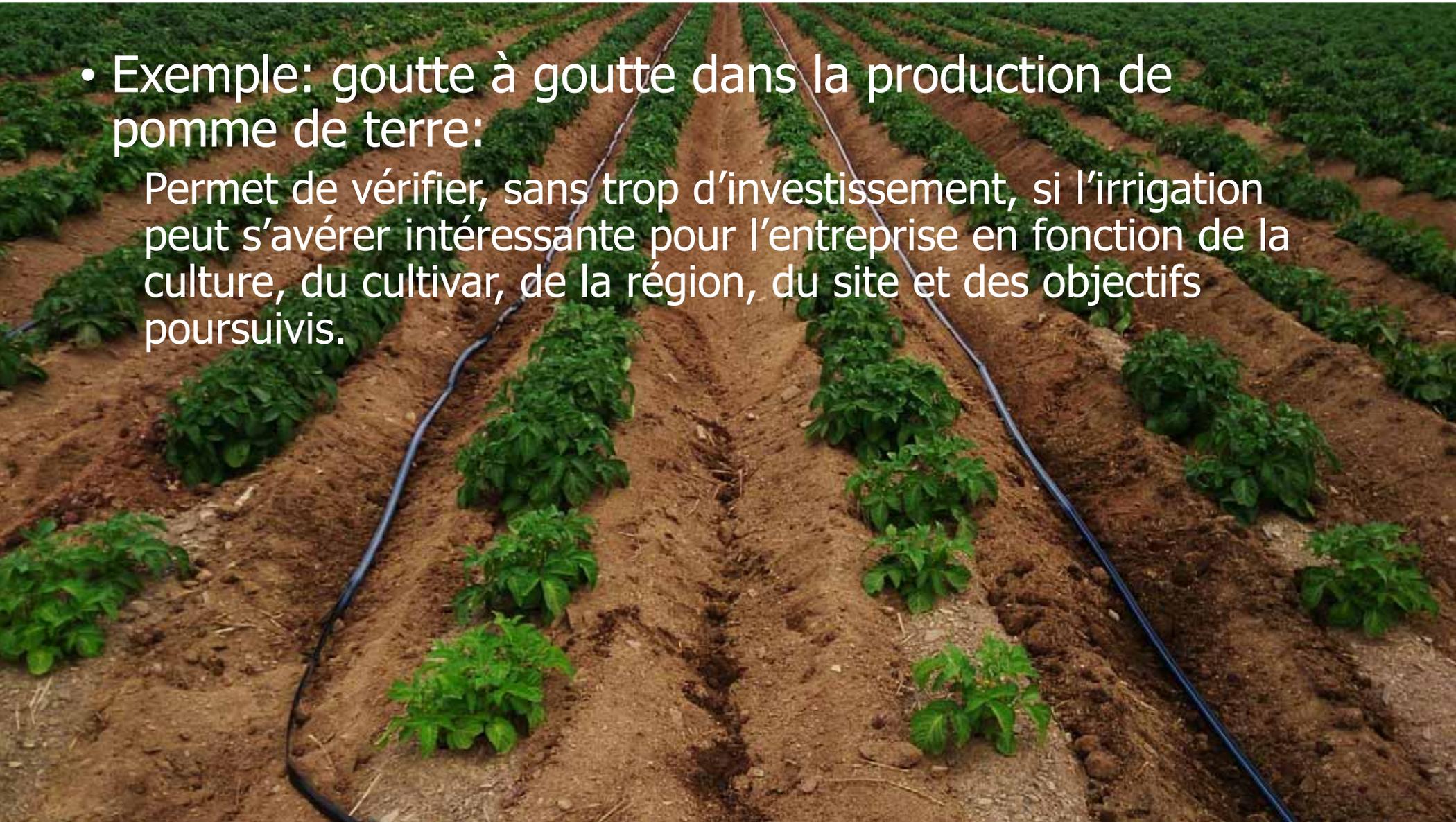
Objectifs de l'irrigation

1. Évaluer la pertinence
2. Assurance-récolte
3. Protection contre le gel
4. Germination et croissance de jeunes plantules
5. Rendement vendable maximal?
6. Fertigation
7. Calibre (ex. pomme de terre)
8. Autres: ex.: érosion éolienne, diminution de la température du couvert végétal, etc.

Évaluer la pertinence

- Exemple: goutte à goutte dans la production de pomme de terre:

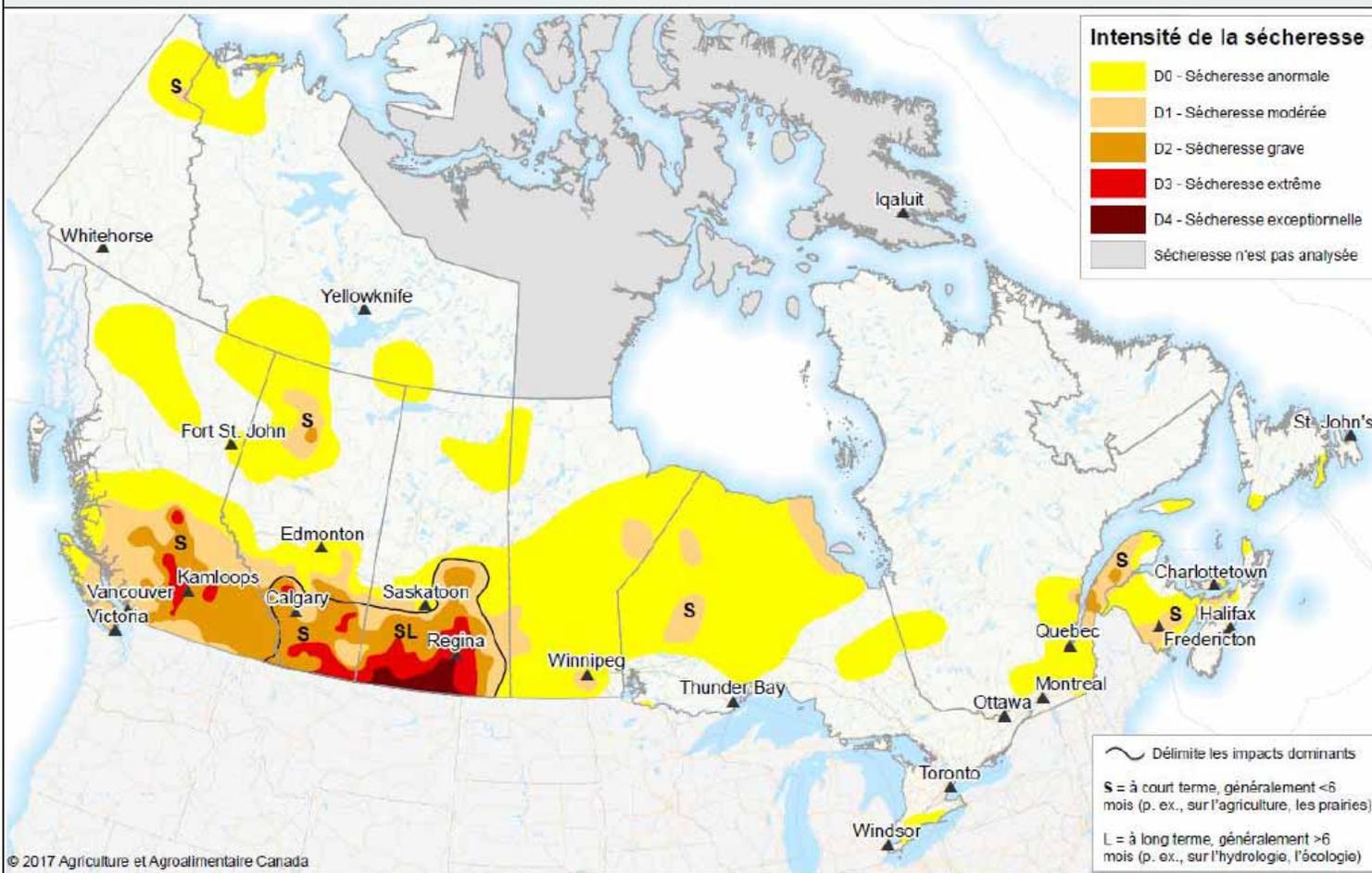
Permet de vérifier, sans trop d'investissement, si l'irrigation peut s'avérer intéressante pour l'entreprise en fonction de la culture, du cultivar, de la région, du site et des objectifs poursuivis.



Assurance-récolte

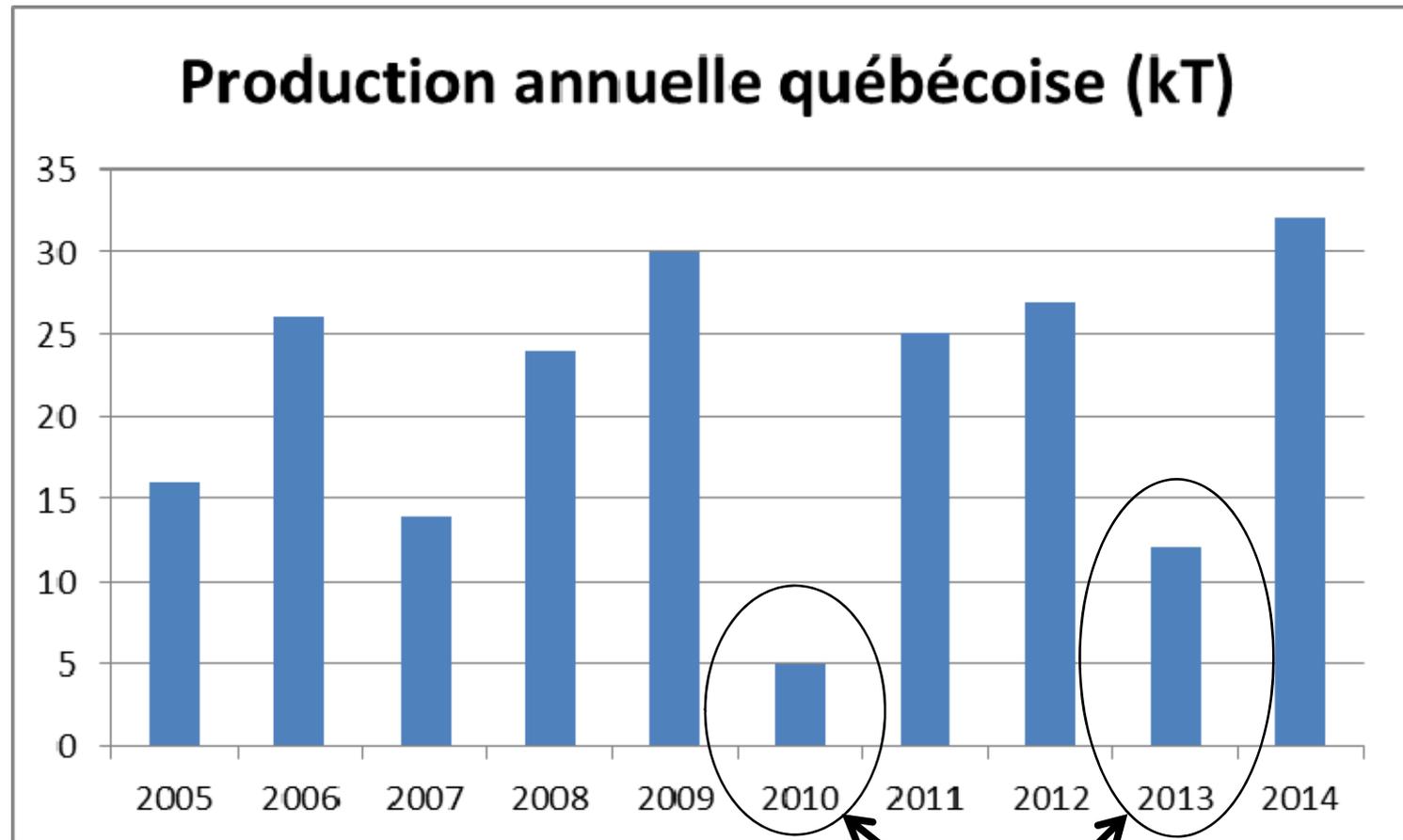
Outil de surveillance des sécheresses au Canada

Conditions en date du 30 septembre 2017



Assurance-récolte

Évolution de la production commercialisée des bleuets sauvages au Québec



Source: MAPAQ, 2016

Gels printaniers

Protection contre le gel

mm d'eau/h à appliquer pour protéger contre le gel

Vitesse du vent à la hauteur de la culture (km/h)	Température de l'air dans le couvert végétal			
	-2,8°C	-4,4°C	-6,7°C	-7,8°C
0 - 2	2,5	2,5	4,0	5,0
3 - 6	2,5	4,0	7,5	10,0
7 - 14	2,5	7,5	15,2	17,5
15 - 19	2,5	10,0	20,0	25,0
20 - 35	5,0	20,0		

Protection contre le gel

Ce n'est pas la glace qui protège contre le gel, mais bien l'eau qui dégage de la chaleur en gelant.

Il faut donc irriguer continuellement durant toute la période de gel.



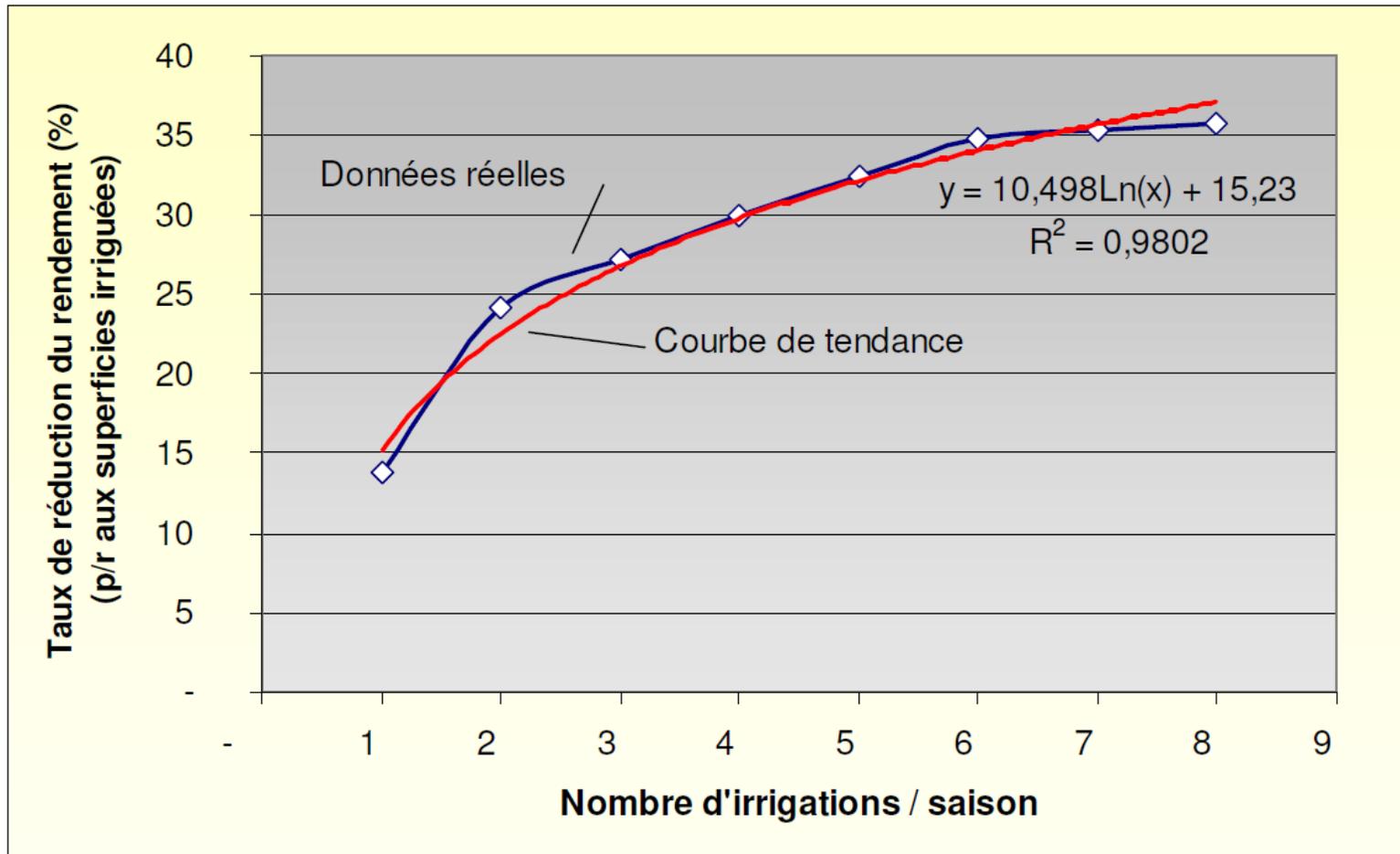
Photo : OMAFRA

Germination et croissance de jeunes plantules



Rendement vendable maximal?

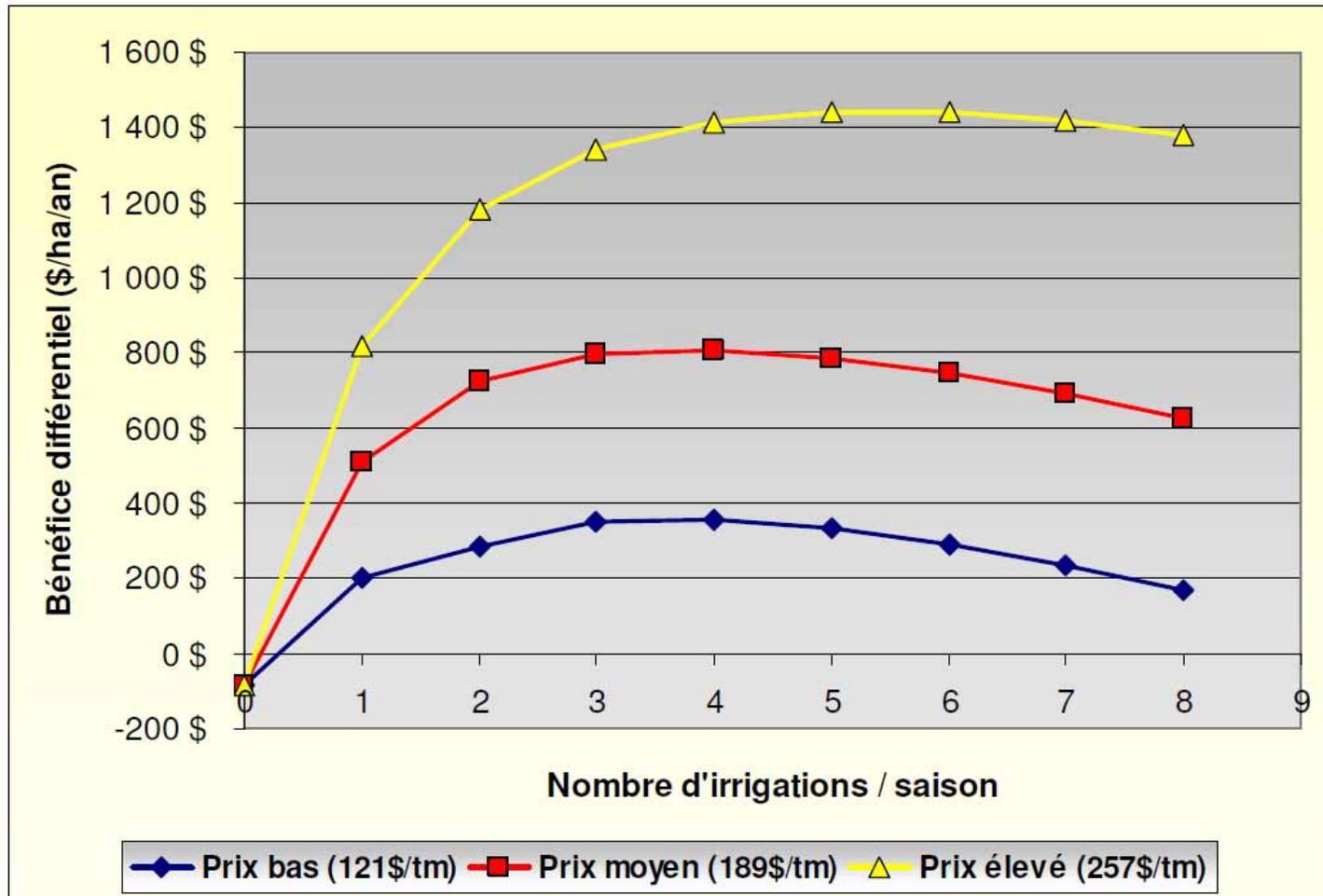
Diminution des rendements des superficies en pommes de terre non irriguées par rapport aux superficies irriguées à l'Île d'Orléans pour différentes pratiques d'irrigation



BPR (2008)

Rendement vendable maximal?

Bénéfices additionnels des systèmes irrigués dans la production de pomme de terre en fonction du nombre d'irrigations et du prix du marché à l'île d'Orléans

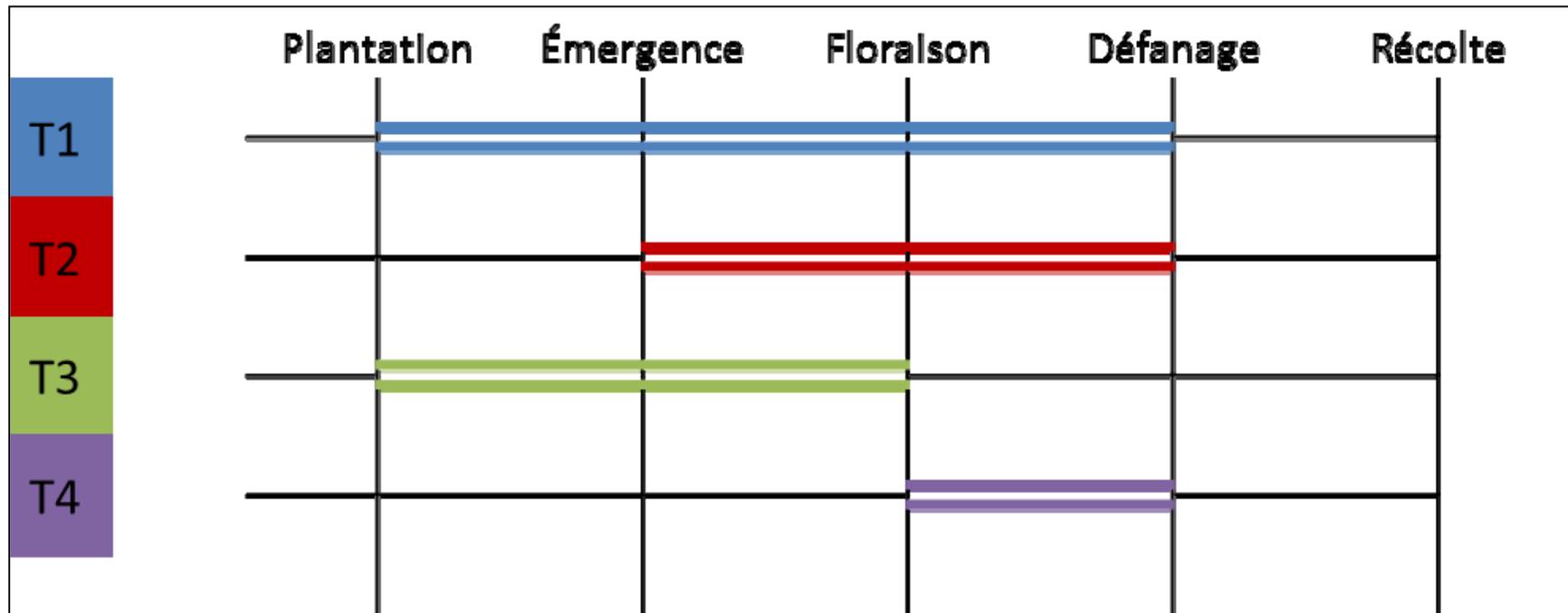


BPR (2008)

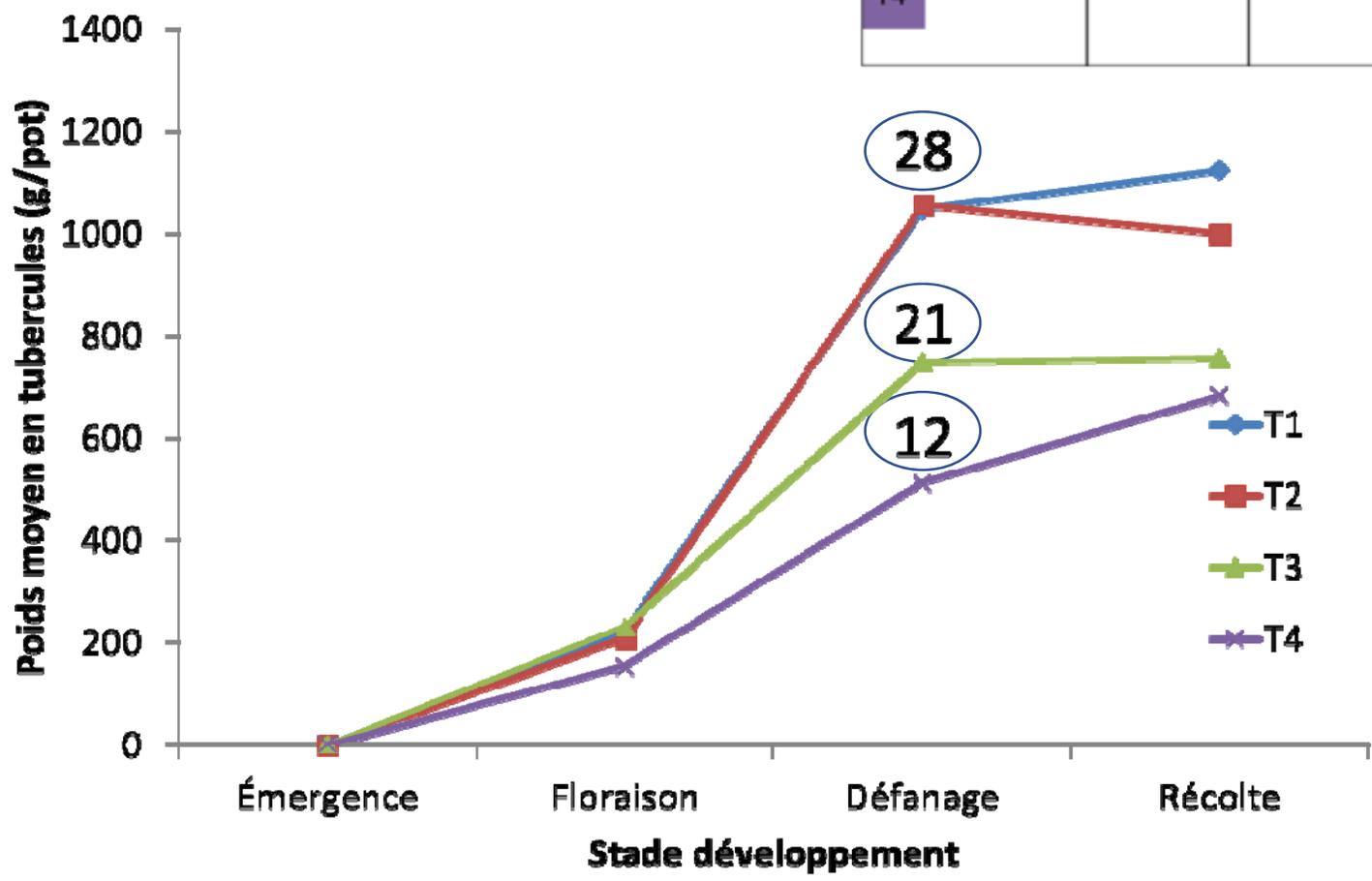
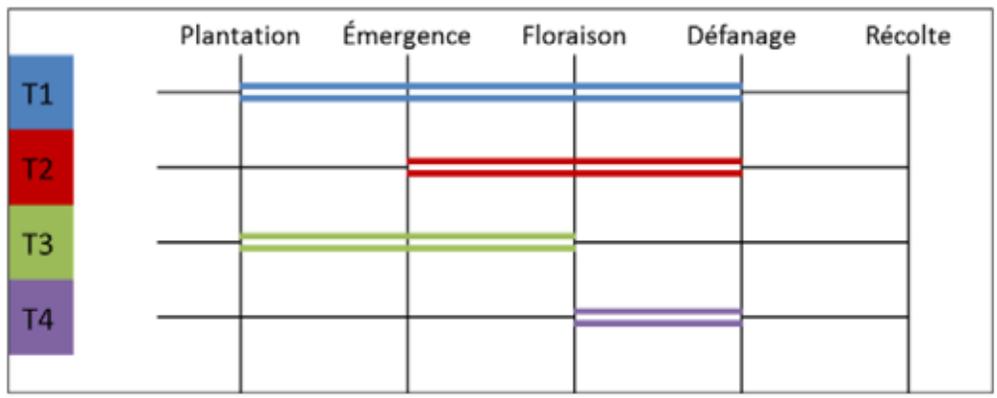
Fertigation

- **Fertilisation** + irrig**ation** = **Fertigation**
- Très utile, en particulier en plasticulture
- Permet de fractionner les applications de fertilisants au cours de la saison et de les synchroniser aux périodes de prélèvement
- Évite de mettre de grandes quantités de fertilisants au départ de la végétation et qui seraient soumis au lessivage

Essai d'irrigation de la pomme de terre en pots en serre



Essai d'irrigation de la pomme de terre en pots en serre



○ = nb de tubercules

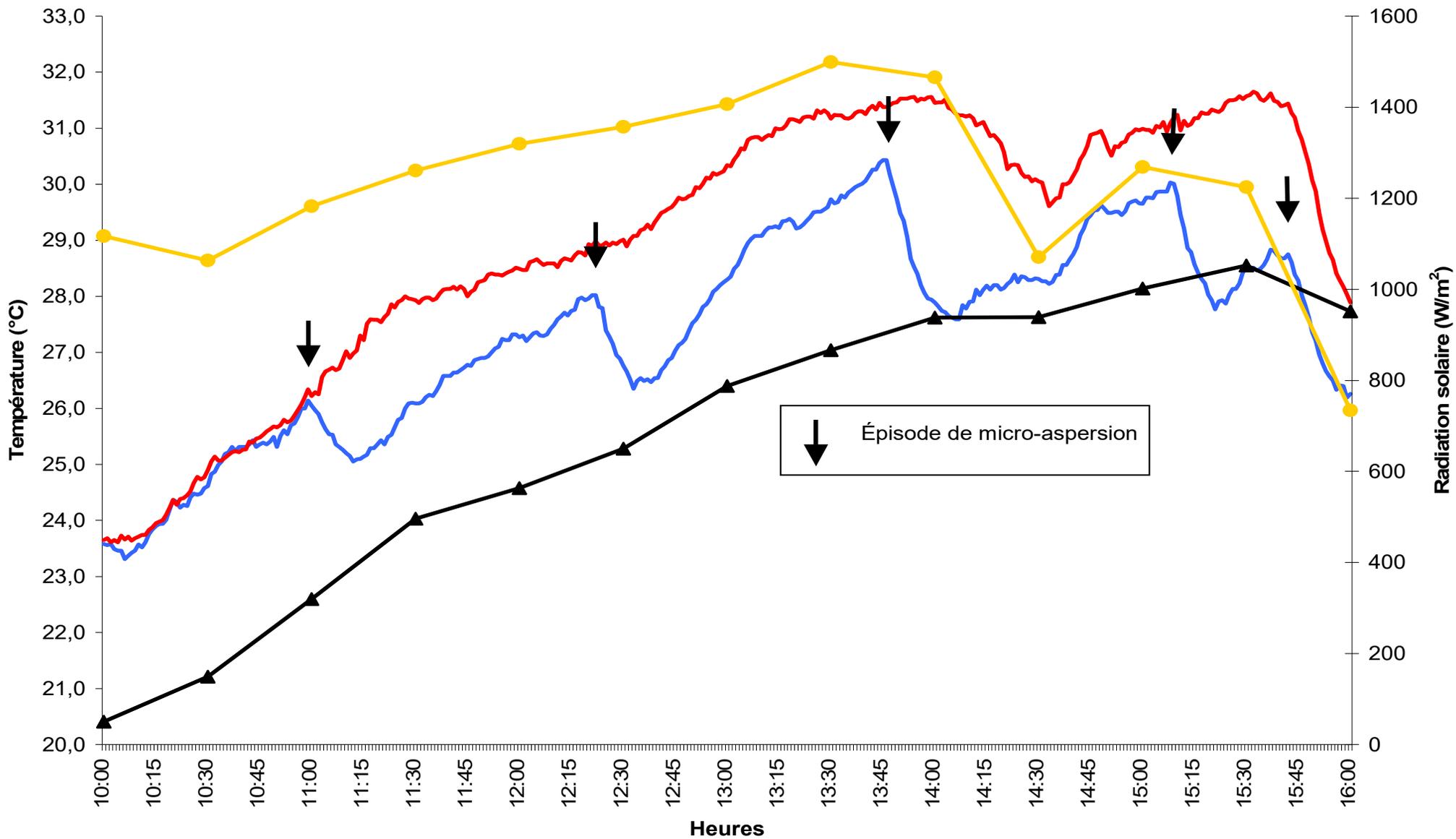
Adapté de Landry, Boivin et Vallée (2014)

La micro-aspersion à la rescousse

- Application de petites quantités d'eau sur le couvert végétal
- Refroidissement par évaporation



Avec refroidissement Sans refroidissement Air ambiant Radiation solaire



Autres applications

- Contrer l'érosion éolienne
 - Sols sableux ou organiques...
- Diminuer les désordres physiologiques
 - Ex.: brûlure de la pointe dans la laitue, pourriture apicale dans les légumes, etc.

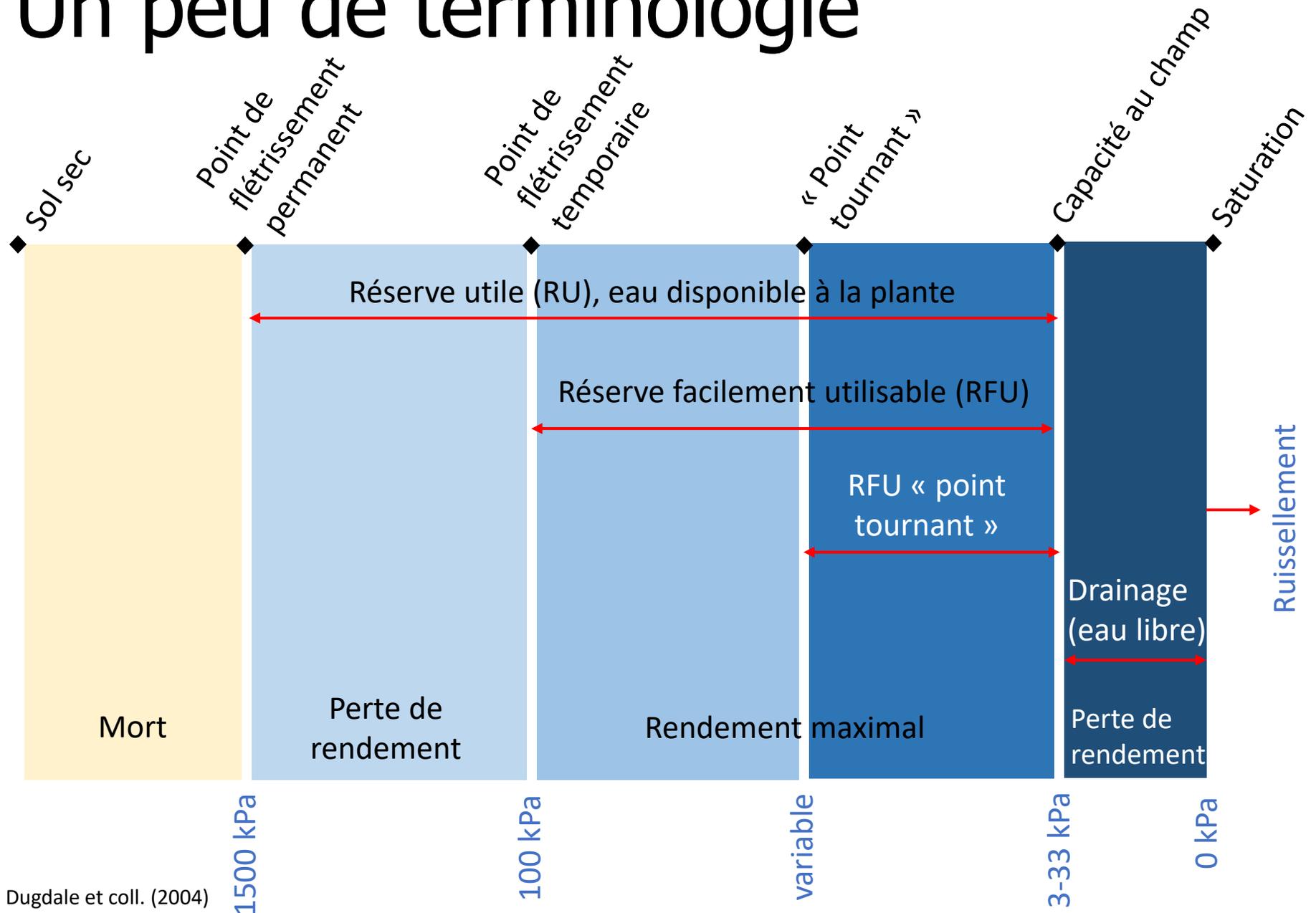
Les ressources

- Le sol
- L'eau
- La culture

Le sol

- Principales terminologies
- Capacité de rétention en eau
- Texture et détritrus
- Densité et compaction

Un peu de terminologie



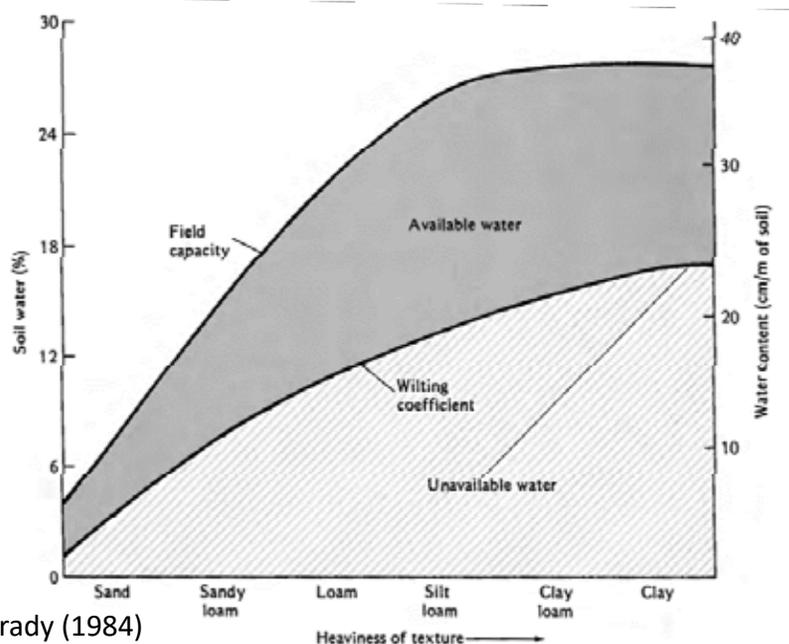
Caractérisation physique du sol

But: Améliorer notre connaissance sur la dynamique de l'eau dans le sol en vue de maximiser la régie de l'eau.



Comment déterminer la capacité de rétention en eau des sols ?

- De manière théorique avec la texture du sol
 - De nombreuses sources d'informations existent sur le sujet
- De manière pratique avec des échantillons et de la volonté (courbe de désorption en eau)



Brady (1984)



Courbes de désorption en eau (régime permanent)



- Caractéristiques physique spécifique
- Méthode précise
- Longue (plusieurs semaines)
- Nécessite du matériel de laboratoire spécialisé (table à tension et marmite à pression)

« Caractérise l'espace poral et la surface spécifiques des particules constituant le sol. »

Caractérisation

Échantillonnage du sol

- Propriétés physico-chimiques du sol
 - Texture, granulométrie détritux, courbe de désorption en eau, pH, matière organique





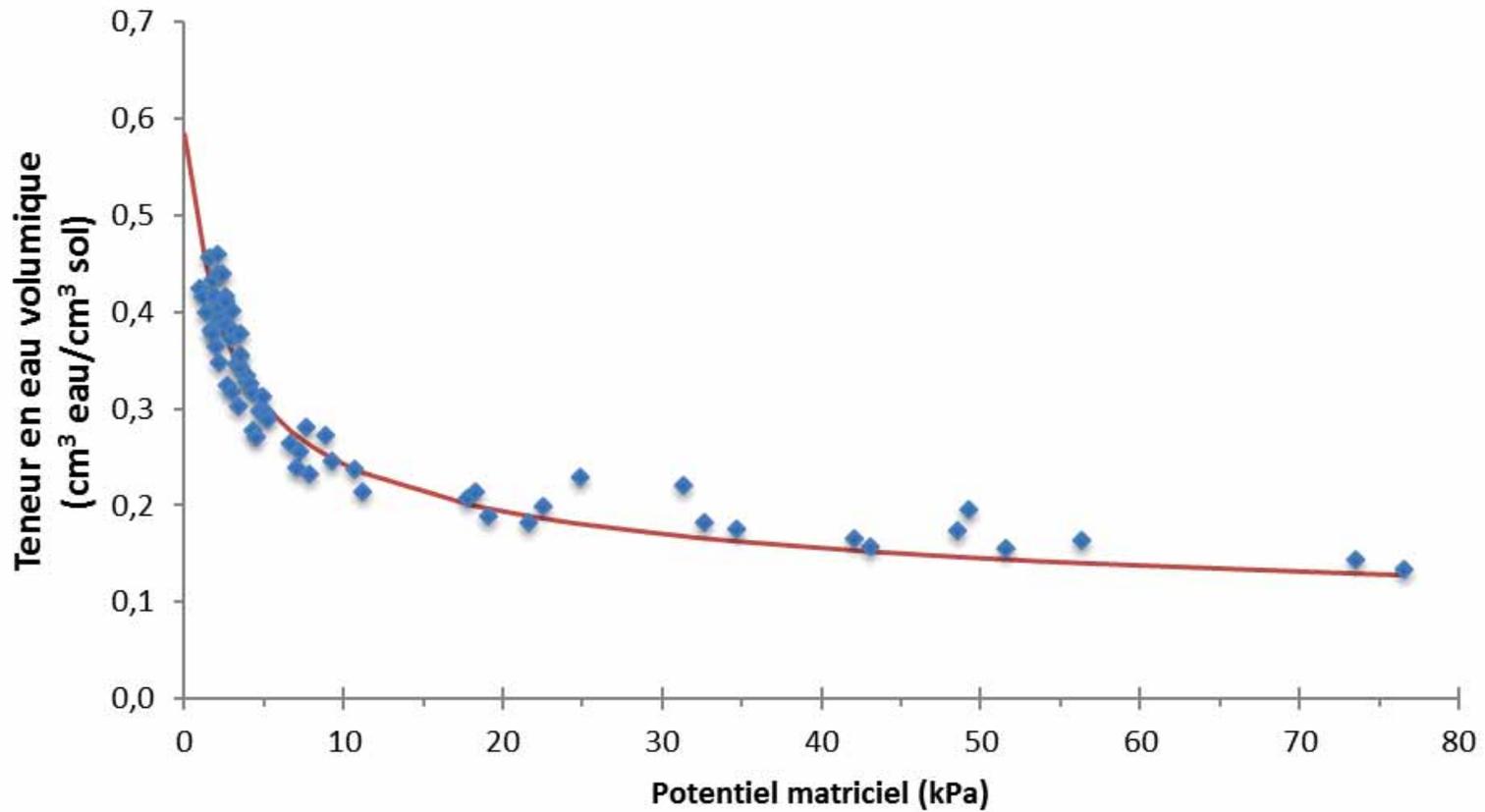




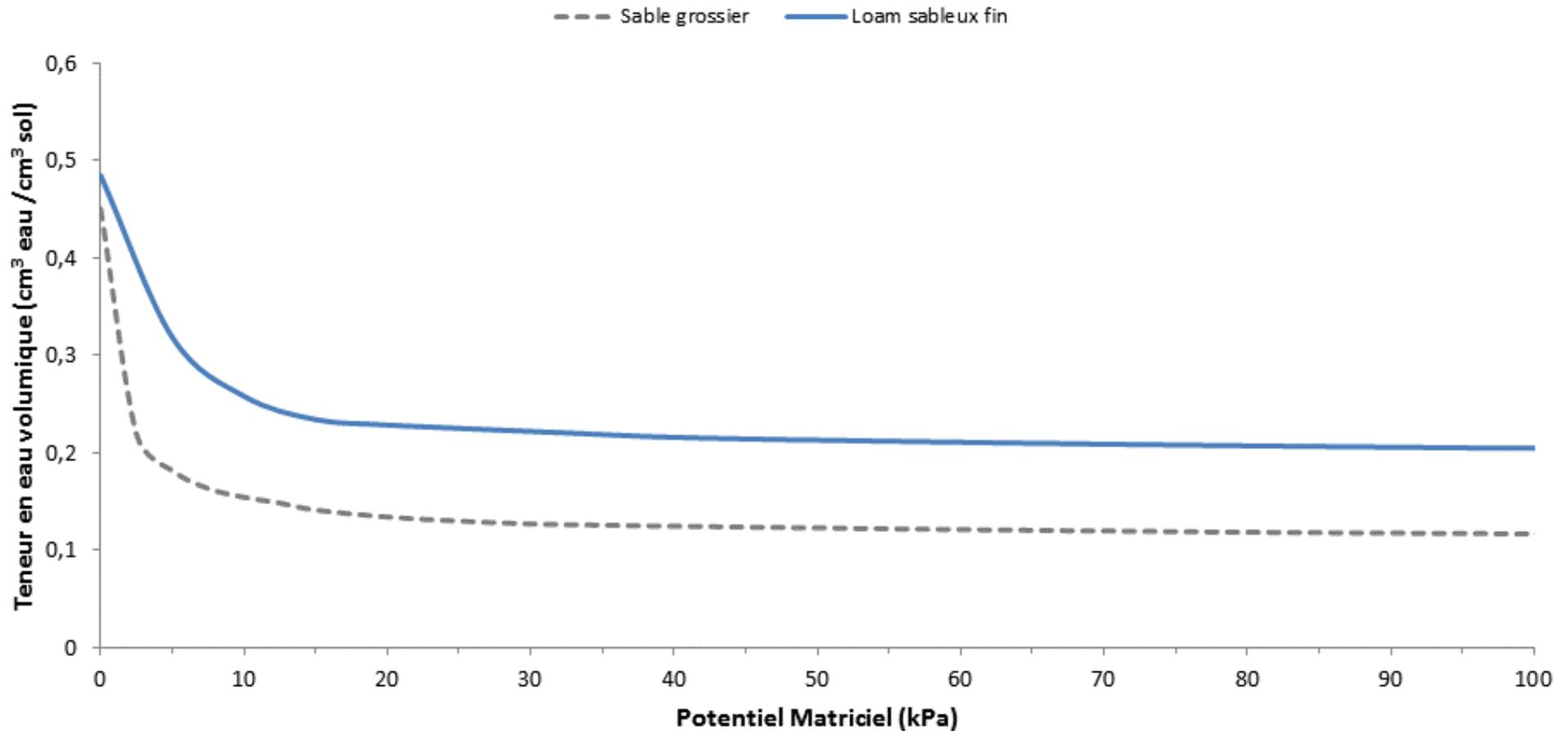




Courbe de désorption en eau



Relation entre le potentiel matriciel et la teneur en eau volumique



Réserve en eau du sol (Littérature)

Texture du sol	Réserve utile (RU) (mm d'eau disponible/cm de sol)			
	1	2	3	4
Sable	0,5 à 0,8	0,6 à 0,75	0,83	0,4 à 0,8
Sable loameux	0,7 à 1,0	0,75 à 1,10	1,0	0,6 à 1,2
Loam sableux	0,9 à 1,2	1,0 à 1,6	1,25	1,1 à 1,5
Loam	1,3 à 1,7	1,5 à 2,2	1,75	1,7 à 2,3
Loam limoneux	1,4 à 1,7	1,7 à 2,5	n.d.	1,7 à 2,3
Loam limono-argileux	1,5 à 2,0	1,7 à 2,2	2,08	1,4 à 2,1
Loam argileux	1,5 à 1,8	1,7 à 2,2	2,0	1,4 à 2,1
Argile	1,5 à 1,7	1,5 à 2,0	2,0	1,6 à 1,8

¹ OMAFRA (1990)

² Dugdale et coll.
cité dans Stetson
et Mecham (2011)

³ Van der Gulik
(2010)

⁴ NDSU (2017)

Réserve en eau du sol (IRDA)

- Réserve en eau peuvent être très variable pour une même texture
- Il faut connaître
 - le % des particules > 2 mm
 - la densité de l'échantillon

Classes texturales (nombre d'échantillon)	Réserve en eau facilement utilisable (RFU) mm eau / cm sol	RFU pour 30 cm de sol
Sable (10)	0,4 à 1,15	12 à 35
Sable loameux (19)	0,45 à 1,25	13,5 à 37,5
Limon (0)	-	-
Loam sableux (17)	0,35 à 1,6	10,5 à 48
Loam (9)	0,4 à 1,30	12 à 39
Loam limoneux (0)	-	-
Loam sablo-argileux (12)	0,4 à 1,45	12 à 43,5

Comment mesurer la masse volumique apparente (MVA)

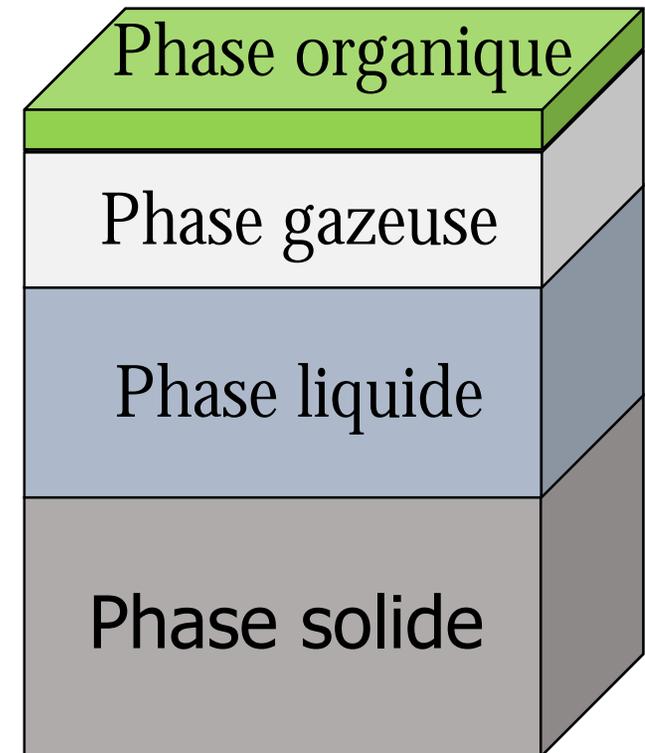




- test

Compaction

- ↑ de la densité; réduction de la porosité d'un sol
- Conséquences:
 - ↓ de la conductivité hydraulique
 - ↓ de l'infiltration de l'eau
 - ↓ de la réserve en eau du sol
- Impact sur la réserve en eau
 - Limite le volume de sol potentiellement exploitable par le système racinaire
 - ↓ la surface spécifique où l'eau peut être retenue



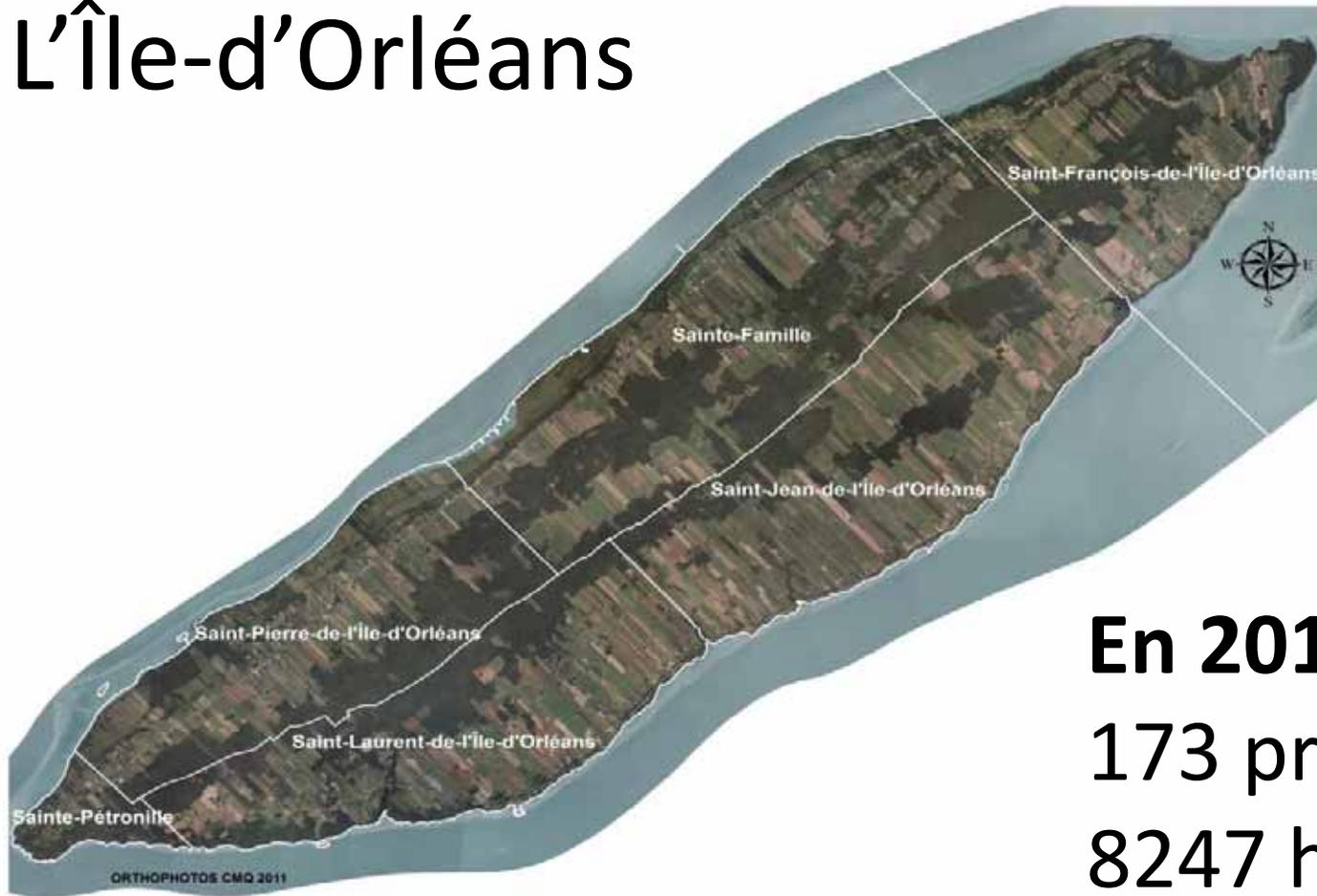
L'eau

- Potentiel d'approvisionnement en eau
- Contraintes possibles
 - Volume
 - Règlementation
 - La qualité

Approvisionnement en eau

- Quel est le potentiel d'approvisionnement en eau?
- Être en mesure de l'estimer correctement
 - Étang et lac; selon les dimension, la recharge?
 - Rivière; peut être difficile à estimer...
- Certificat d'autorisation avec précisions des quantités pouvant être prélevées

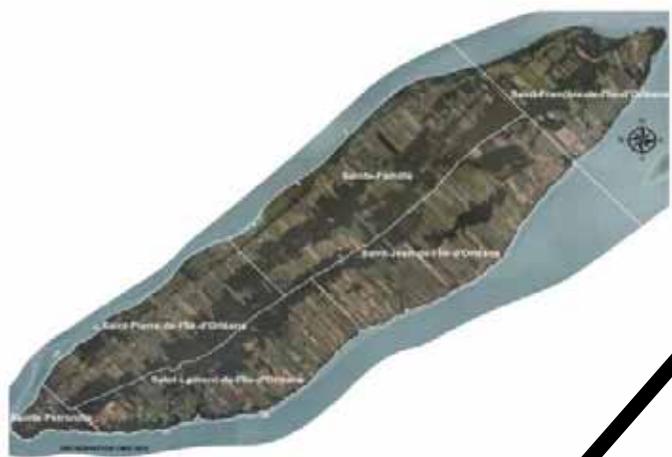
Contraintes d'approvisionnement en eau - L'Île-d'Orléans



En 2010:
173 producteurs
8247 hectares cultivés

Réf. Plan de développement de la zone agricole, MRC de l'Île d'Orléans, 2015

Les cultures à l'Île-d'Orléans



2156 hectares

Autres cultures;
377

Légumes et
pommes de
terre (1568)

Fruits (588)

Fourrages et
paturages;
3067

Céréales et
protéagineux;
2647

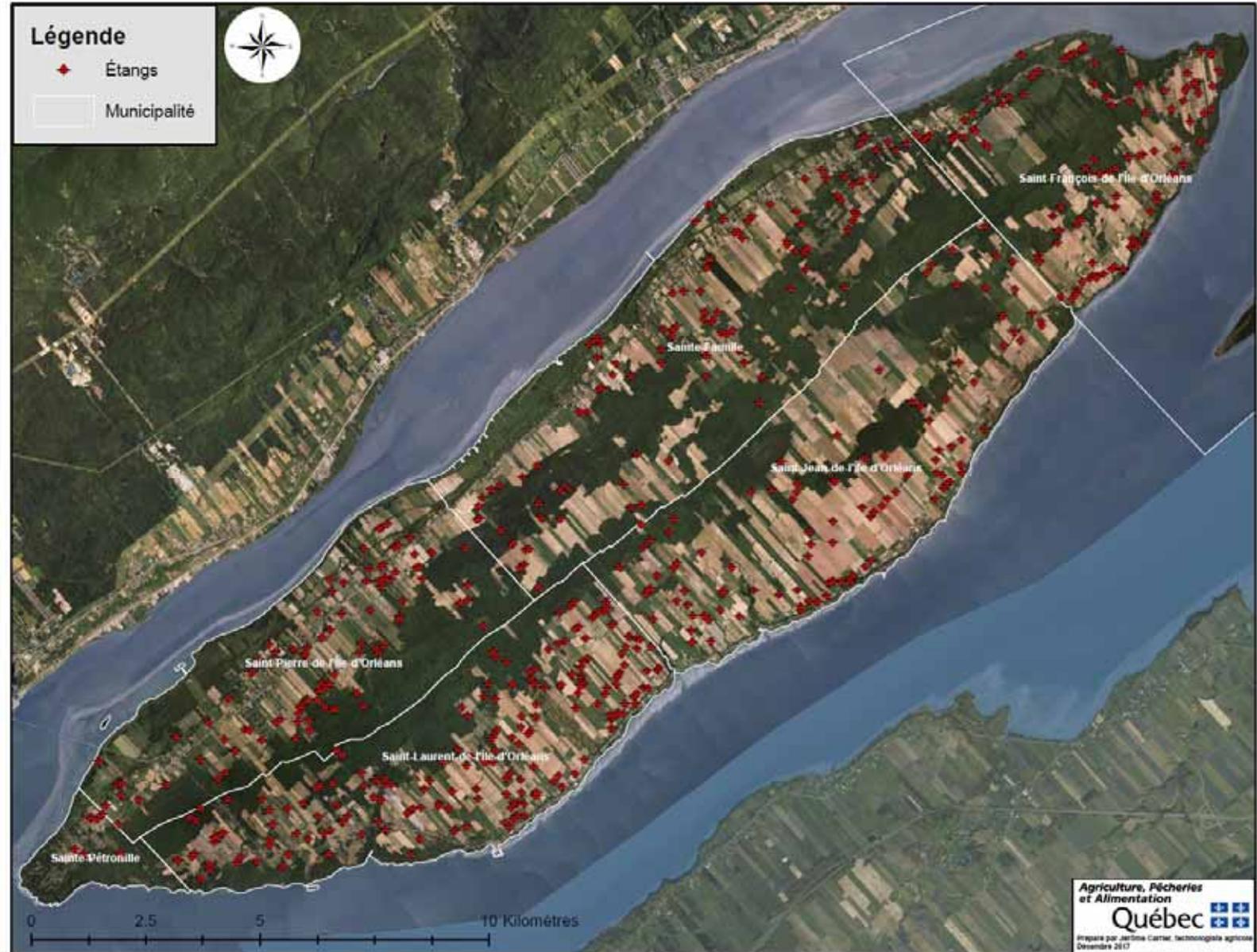
Approvisionnement en eau à l'Île d'Orléans

- Peu d'eau en profondeur
- Rivières à faible débit



Localisation des étangs de l'Île d'Orléans par photo-interprétation

597 étangs
100 hectares



Source:
Orthophotos
CMQ (2016)

Besoins en réserve en eau à l'île d'Orléans

Besoin en réserve

3,9 Mm³

Moins étangs déjà
aménagés

1,9* Mm³

Besoin en réserve non comblé

2 Mm³

* Chiffre établi en appliquant un facteur de 2,2 à la superficie des étangs (BPR, 2008) et qui tient compte d'un facteur d'homogénéité de 0,85.

Aspects réglementaires

- Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eaux et visant à renforcer leur protection (2009)
 - Règlement sur la déclaration des prélèvements d'eau (RDPE) (2009, modifié 2011)
 - Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP (2014))
- Introduction d'un nouveau régime d'autorisation des prélèvements d'eau

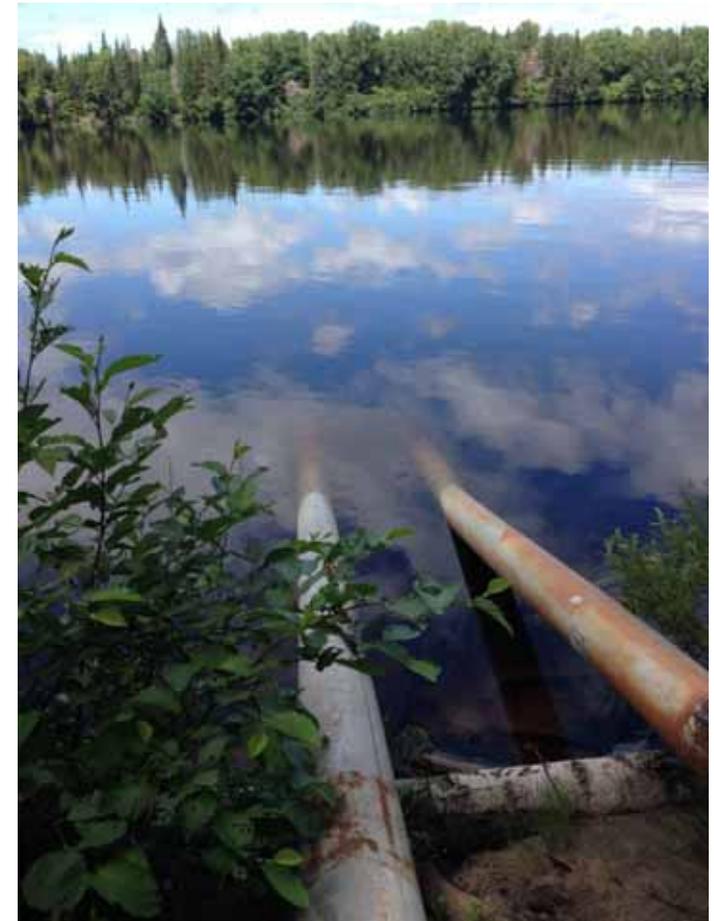
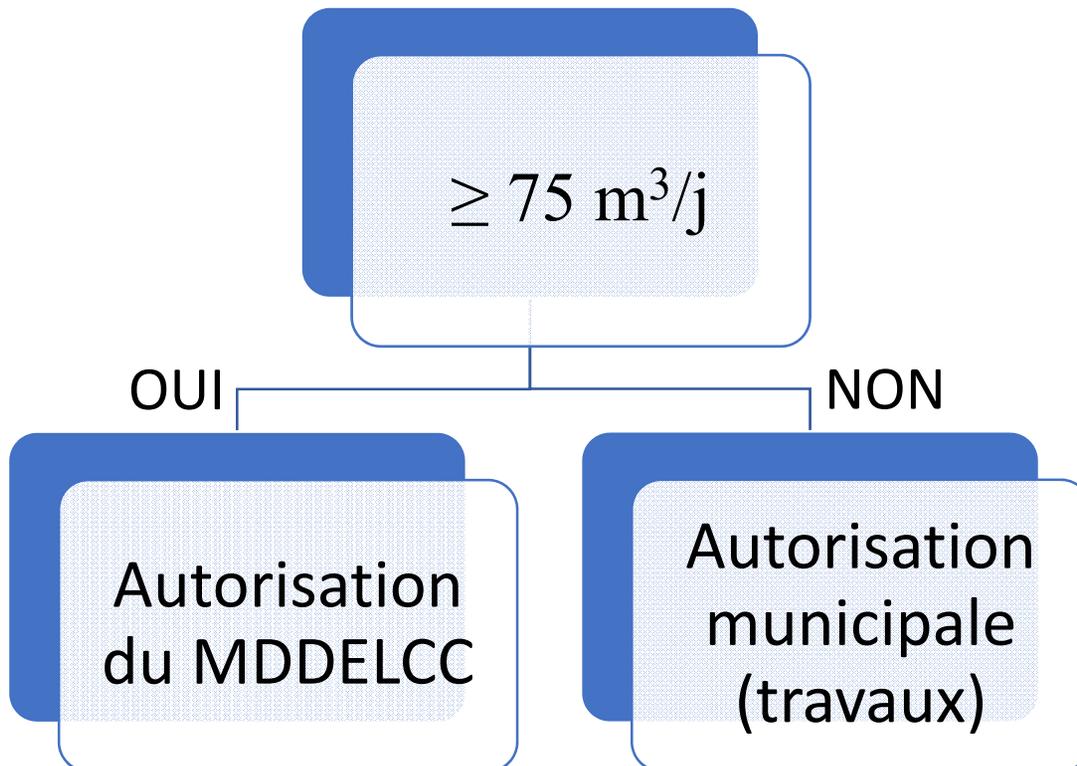


Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP)

- Article 31.75
 - S'applique partout au Québec
 - Prélèvement $\geq 75\ 000$ litres par jour (débit maximum établi sur une période de 90 jours en période de pointe, article 3)
- Prélèvement d'eau qui ont débuté avant le 14 août 2014 sont considérés avoir été autorisés.
- Assujettissement d'un prélèvement d'eau à une autorisation (1^{ère} autorisation entre 2024 et 2029 selon les débits, valide 10 ans)

Quelques exemples RPEP

- Prélèvement dans un puits (eau souterraine) , un lac ou une rivière



Exemple de prélèvement d'eau soustrait à l'autorisation (LQE 31.75)

« Un prélèvement d'eau effectué à même un étang d'irrigation alimenté par l'infiltration d'eau souterraine ou par des eaux de ruissellement, si l'ensemble des conditions suivantes est respecté: »

- d'origine anthropique;
- profondeur < 6 m;
- aménagé à plus de 30 m
 - étang (naturel), marais, marécage, tourbière, lac ou d'un cours d'eau;
- aménagé à plus de 100 m d'un site de prélèvement d'eau souterraine effectué sur une propriété voisine à des fins de consommation humaine;
- n'est pas destiné à inonder un terrain à des fins de récolte;
- est effectué à l'extérieur du bassin du fleuve Saint-Laurent, s'il est effectué à l'intérieur de ce bassin, < 379 m³/j;



Règlement sur la déclaration des prélèvements d'eau (RDPE)

- Découle de

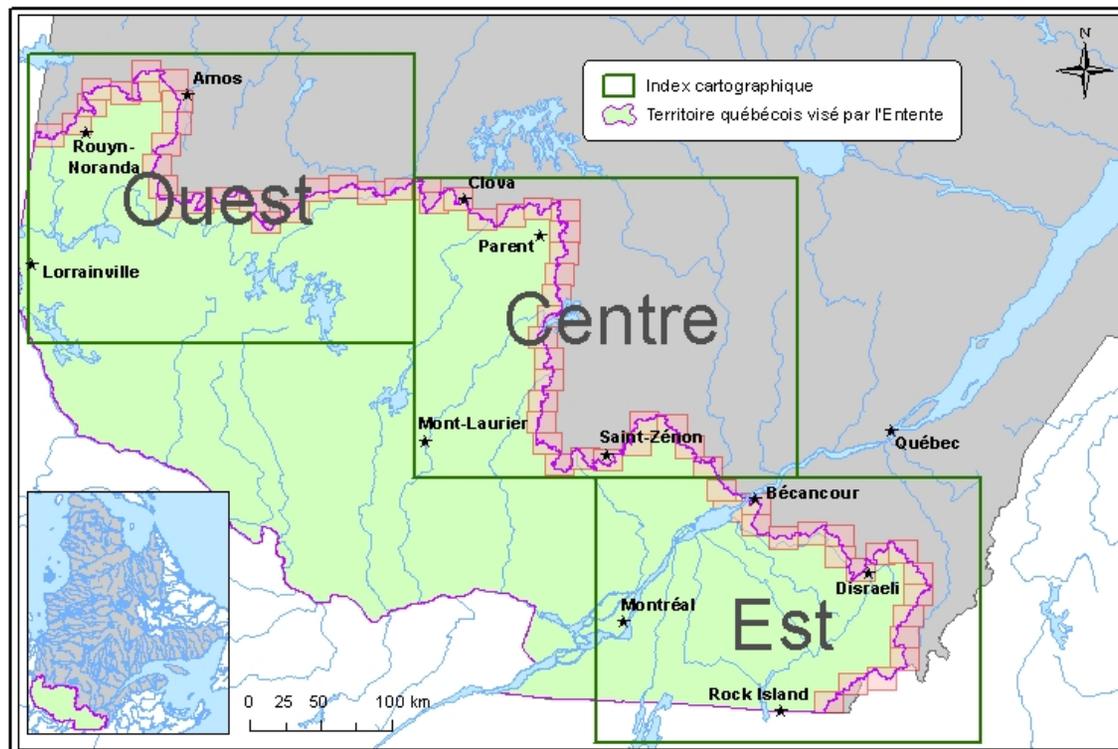
- l'Entente sur les ressources en eaux durables du bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent (2005)
- Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eaux et visant à renforcer leur protection (2009)
 - Règlement sur la déclaration des prélèvements d'eau (RDPE) (2009, modifié 2011)



© Seametrics

Quel est le territoire visé par l'Entente ?

- LQE 31.89
- <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/grandslacs/territoire/index.htm>



RDPE, ce que le règlement dit

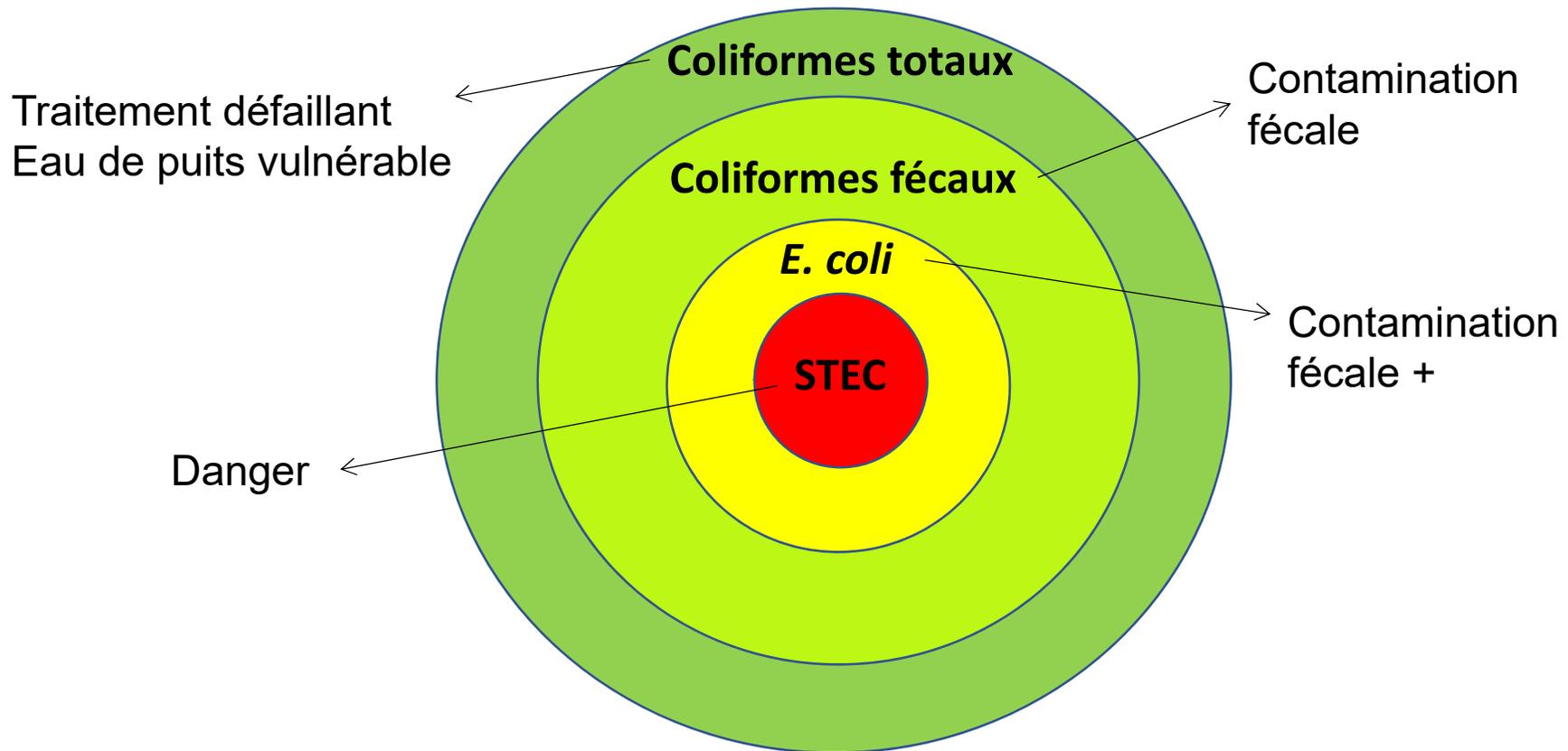
- « À compter du 1^{er} janvier 2012, tout préleveur qui prélève de l'eau dans le bassin du fleuve Saint-Laurent à partir d'un site de prélèvement dont les ouvrages ou les installations ont une capacité nominale de prélèvement égale ou supérieure à 379 000 litres par jour, est tenu de déclarer annuellement »
- Capacité potentielle cumulée de tous les sites de prélèvement de l'entreprise
- Prélèvement réel n'est pas pris en compte



Qualité de l'eau

- Chimique
 - Métaux lourds
 - Pesticides
 - Des pesticides sont présents dans les cours d'eau et l'eau souterraine des régions agricoles (Isabelle Giroux, 2014)
 - Les produits détectés varient selon le type de culture (Isabelle Giroux, 2014)
 - Chaque culture a sa signature, son empreinte
 - Santé / délai avant récolte ?
 - Étang / pulvérisations
 - Eau de surface / présence de pesticides
 - Impact agronomique ?
 - Agriculture biologique ?
 - Toxines (algues)
- Microbiologique
 - Virus, bactéries, parasites

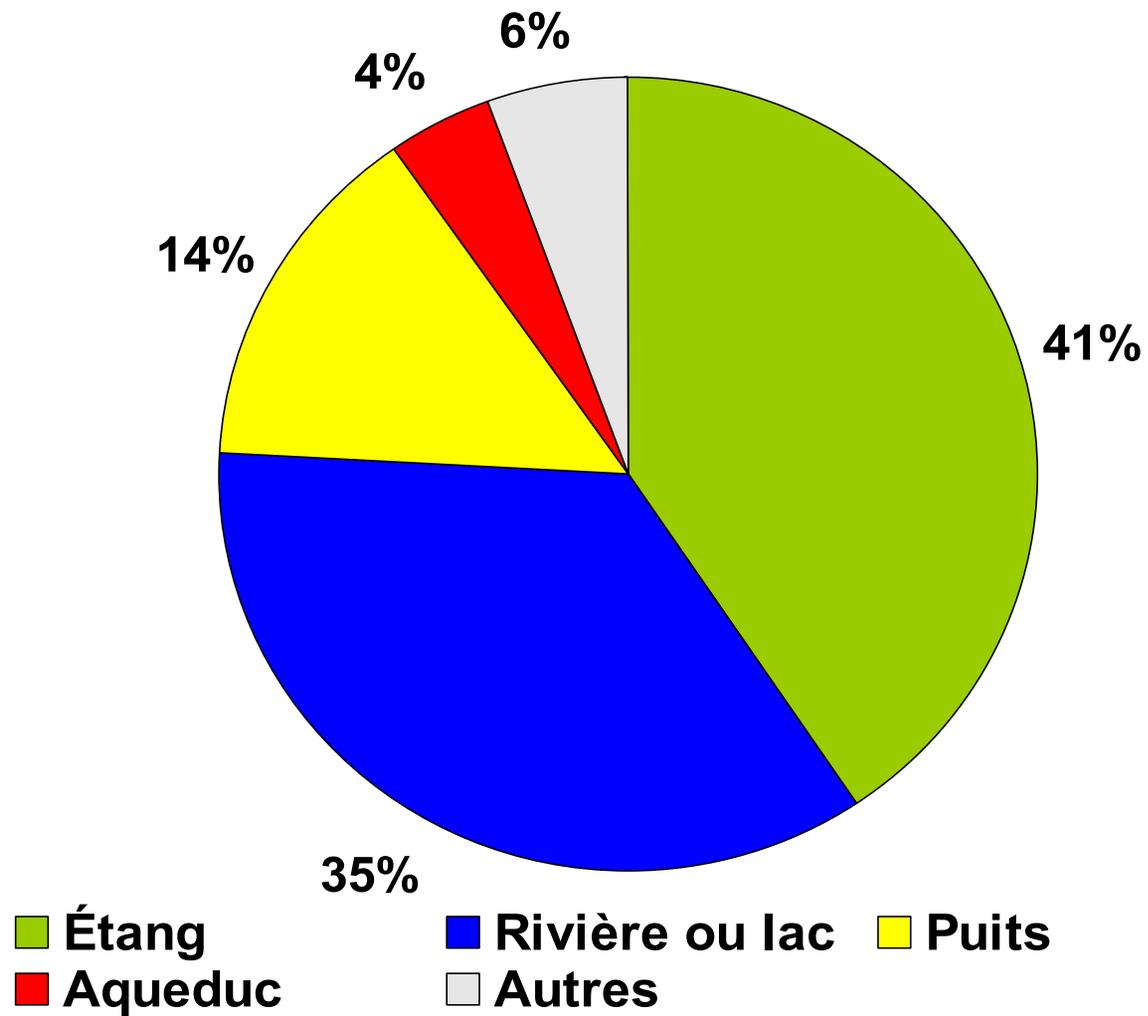
INDICATEURS DE LA QUALITÉ DE L'EAU



Critères des programmes de salubrité

- Canada GAP
 - 100 UFC / 100 ml (coliformes fécaux)
 - 1000 UFC / 100 ml (coliformes totaux)
- Leafy green marketing agreement
 - Moyenne géométrique de 5 échantillons
 - ≤ 126 E. coli / 100 ml
 - Aucun échantillon ne doit dépasser 576 UFC / 100 ml

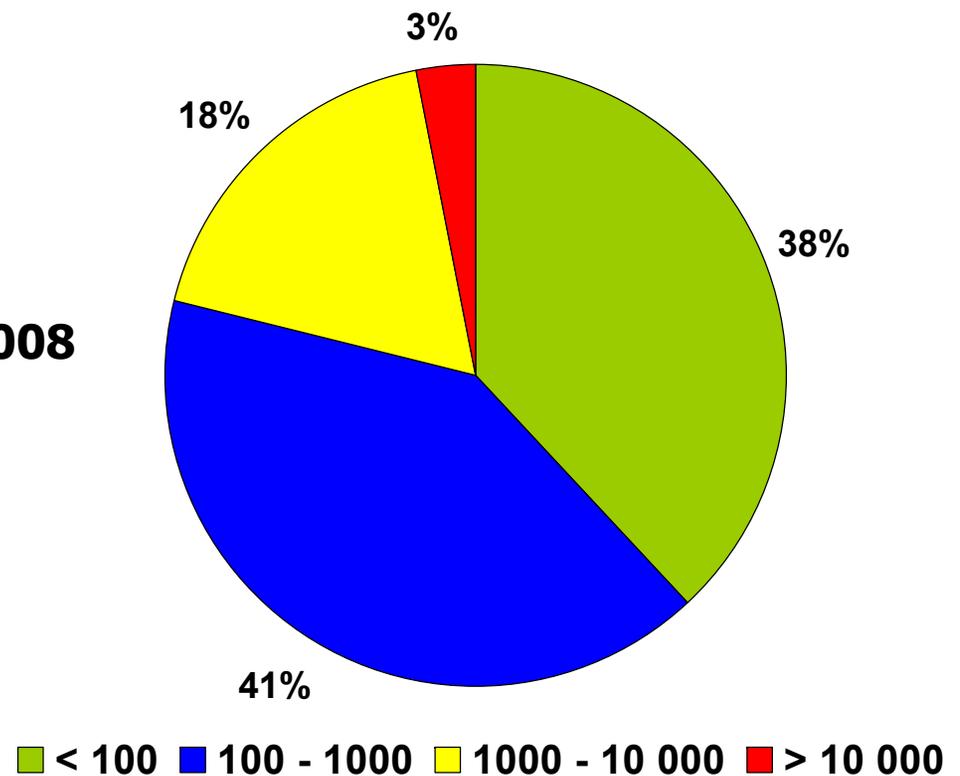
SOURCES D'EAU D'IRRIGATION



BPR (2003)

QUALITÉ DE L'EAU DE SURFACE

- **Lucie Caron (MAPAQ)**
 - PAECQ 2007
 - Plan d'action concertée 2008
 - Réseau rivières 2006-2008
 - CDAQ 2004-2005
 - N = 5882

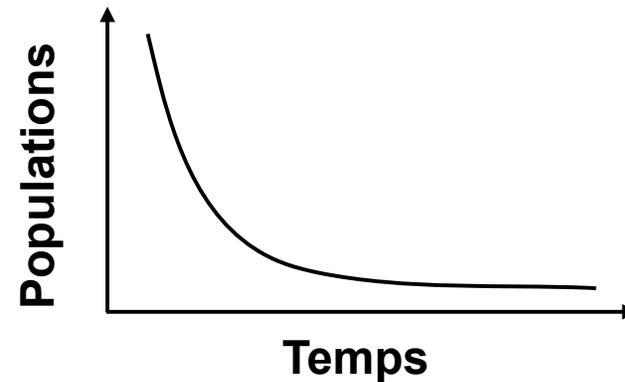


IRRIGATION

- **Mode d'irrigation**
- **Charge vs persistance**
- **Survie des MPPH**
 - Sécheresse
 - UV
 - Compétition
 - Température du sol

- **Stratégies de contrôle**

- Réduire la charge
- Augmenter le délai



DÉLAI IRRIGATION-RÉCOLTE

- **Eau d'irrigation**

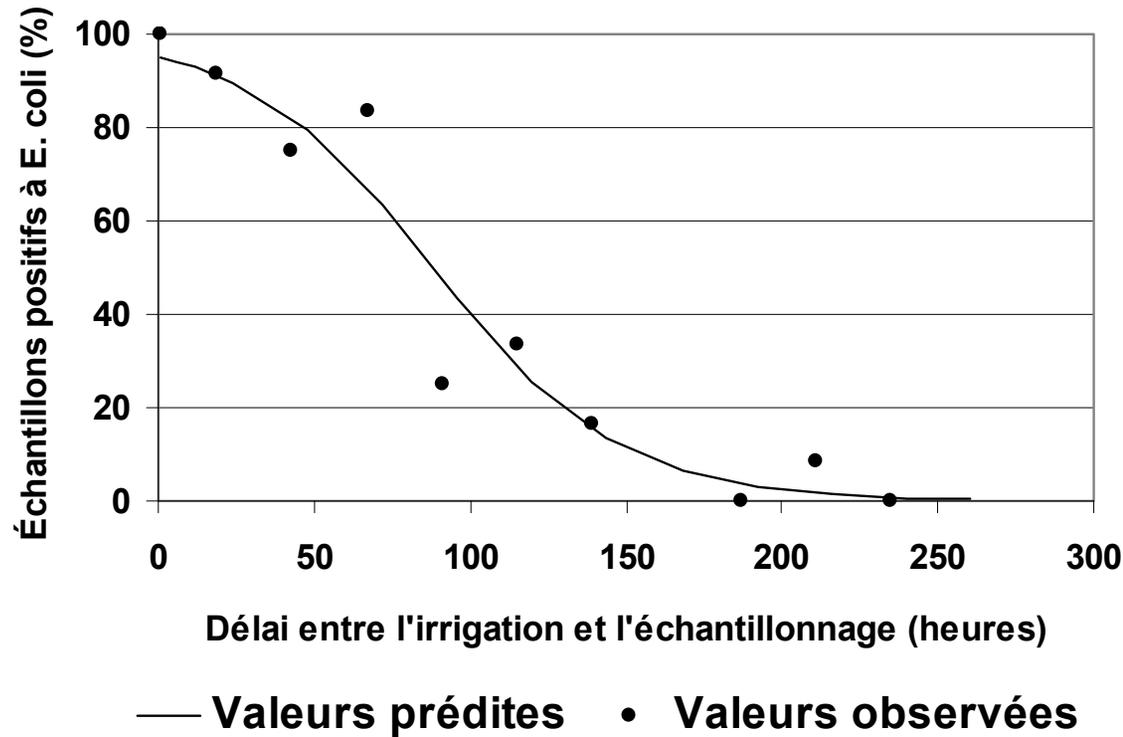
- Fraise
- Laitue
- Crucifères
- Oignon

- **Culture**

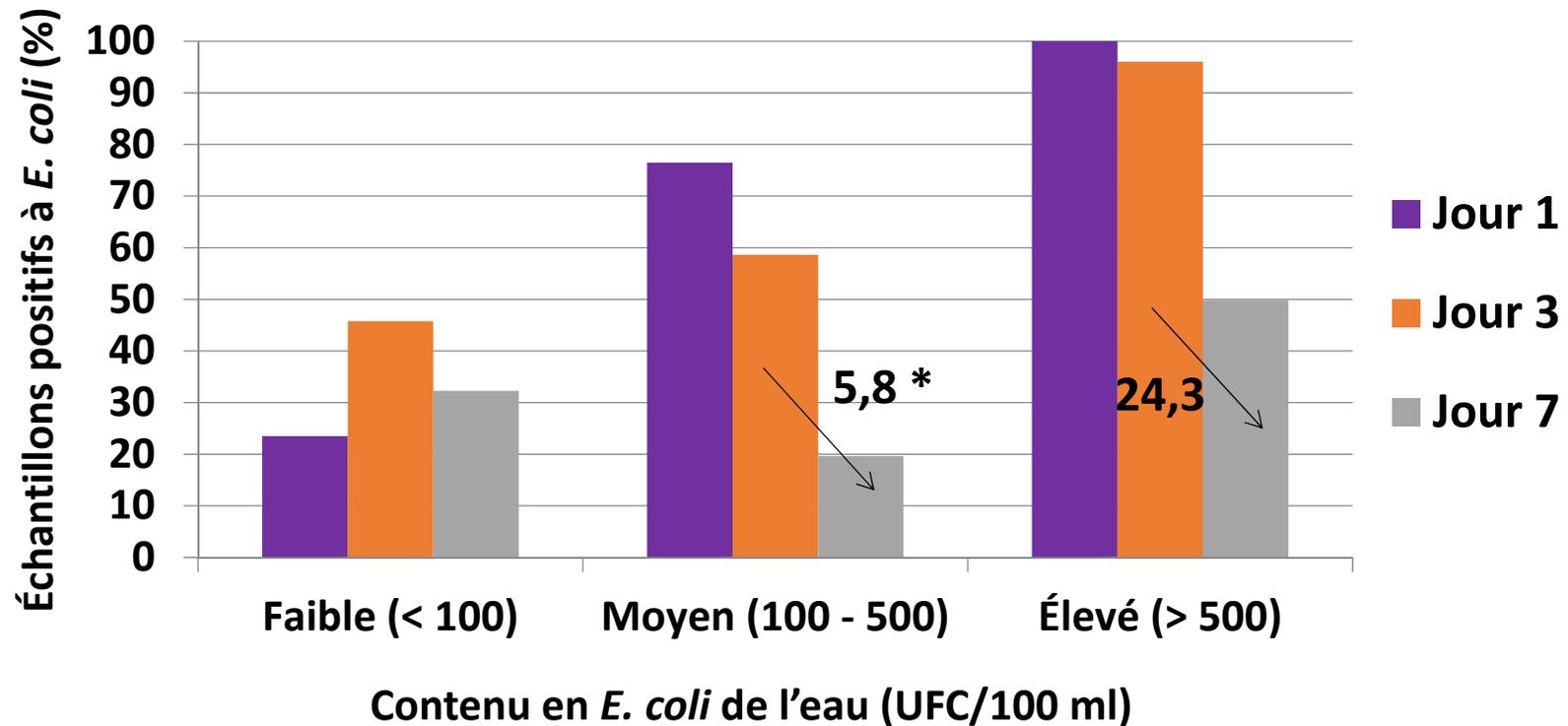
- Morphologie
- Propriétés antimicrobiennes
 - Composés phénoliques, acides organiques
- Pratiques d'irrigation



SURVIE D'*E. COLI* SUR LES CULTURES

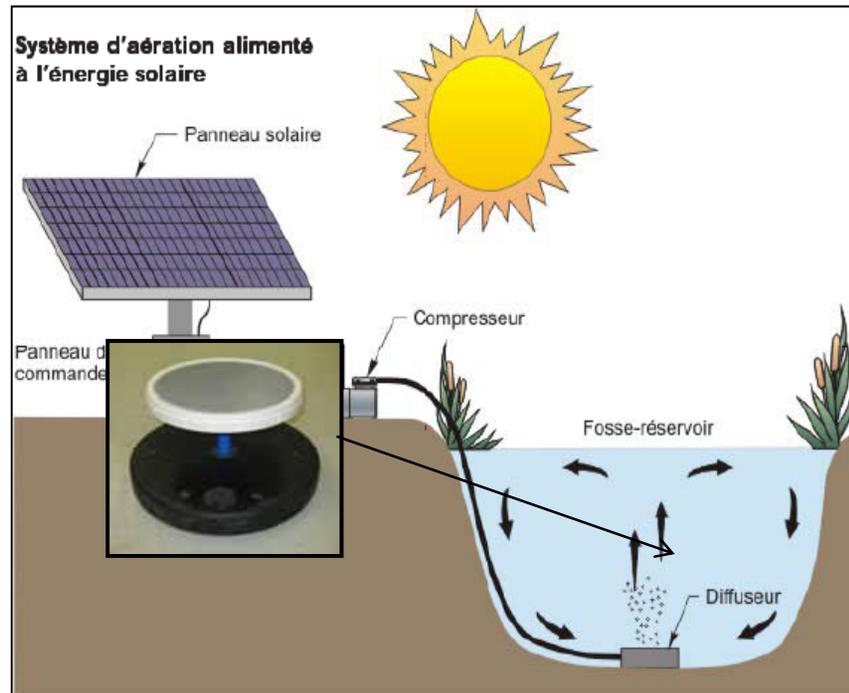


CONTENU DE L'EAU ET DÉLAI



RÉDUIRE LA CHARGE

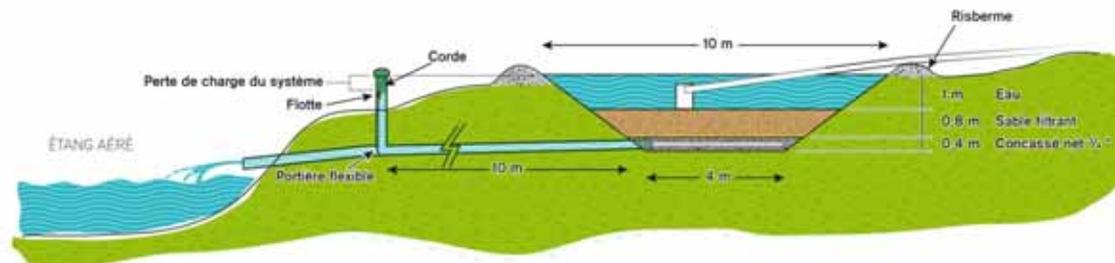
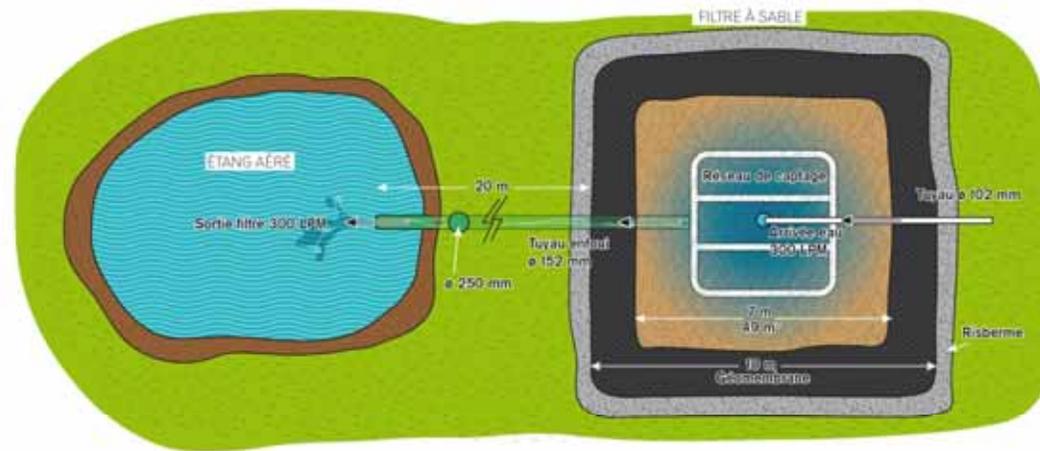
- Prévention
- Aération



Tiré de « Aération des fosses-réservoirs grâce à l'énergie solaire », Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2001.



FILTRATION SUR SABLE ET AÉRATION



FILTRATION SUR SABLE ET AÉRATION



La culture

1. Systèmes cultureux considérés
2. Besoin en eau quotidien
3. Nombre d'épisodes d'irrigation envisageables
4. Volume d'eau nécessaire
5. Périodes critiques
6. Enracinement



Deux systèmes culturaux en exemple

- Pommes de terre
 - Sol : nu et billonné
 - Irrigation : par aspersion



Deux systèmes culturaux en exemple

- Fraise à jours neutres
 - Sol : butté et recouvert de paillis de plastique
 - Irrigation : par goutte à goutte



Ancrage du paillis au sol

Insertion verticale

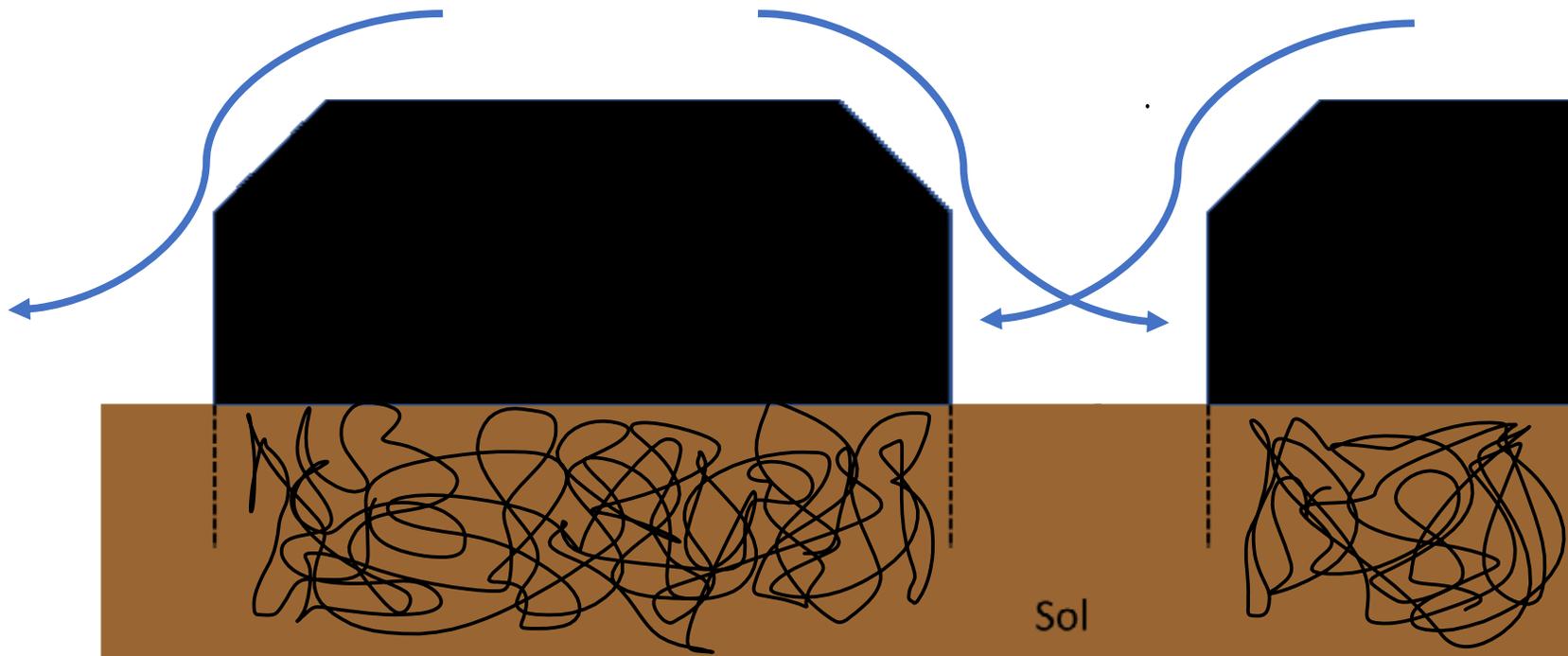
Bordure de sol



Sol

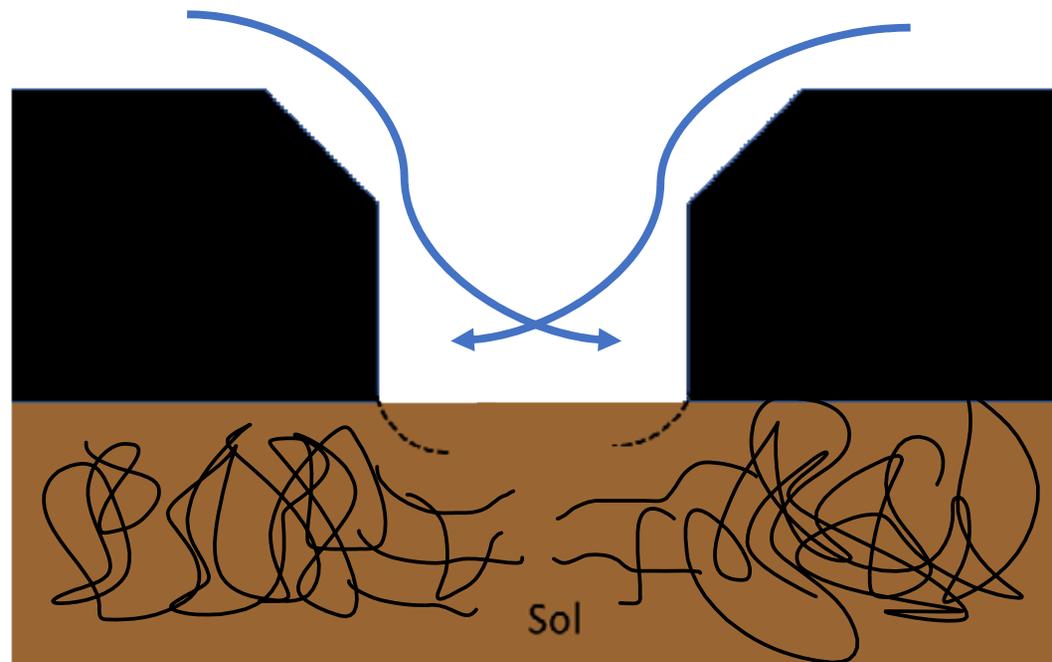
Systeme culturel « Parapluie »

- L'eau de pluie ou d'irrigation (aspersion) est détournée du systeme racinaire
 - Butte, billon, paillis imperméable « insertion verticale »



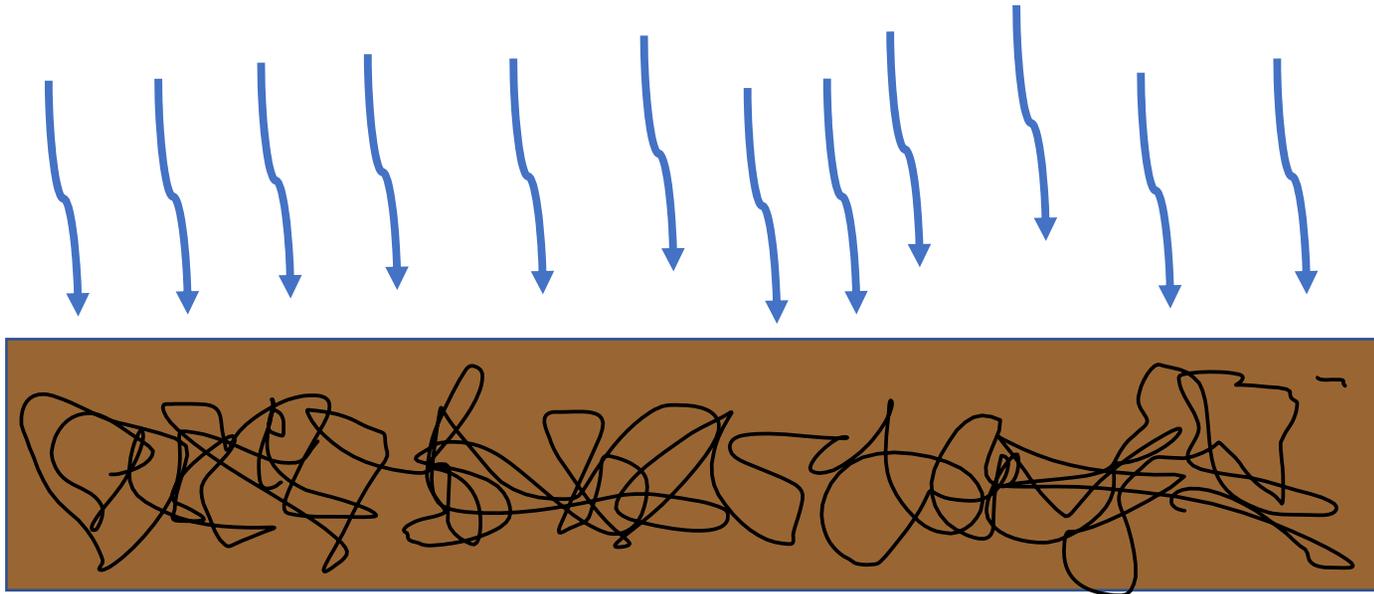
Systeme culturel « Entonnoir »

- Entonnoir
 - L'eau apportée est dirigée vers le systeme racinaire
 - En saison, lorsque les racines colonisent l'entre rang
 - ... paillis imperméable « bordure de sol »
 - Cultures en rangs (en absence de compaction)



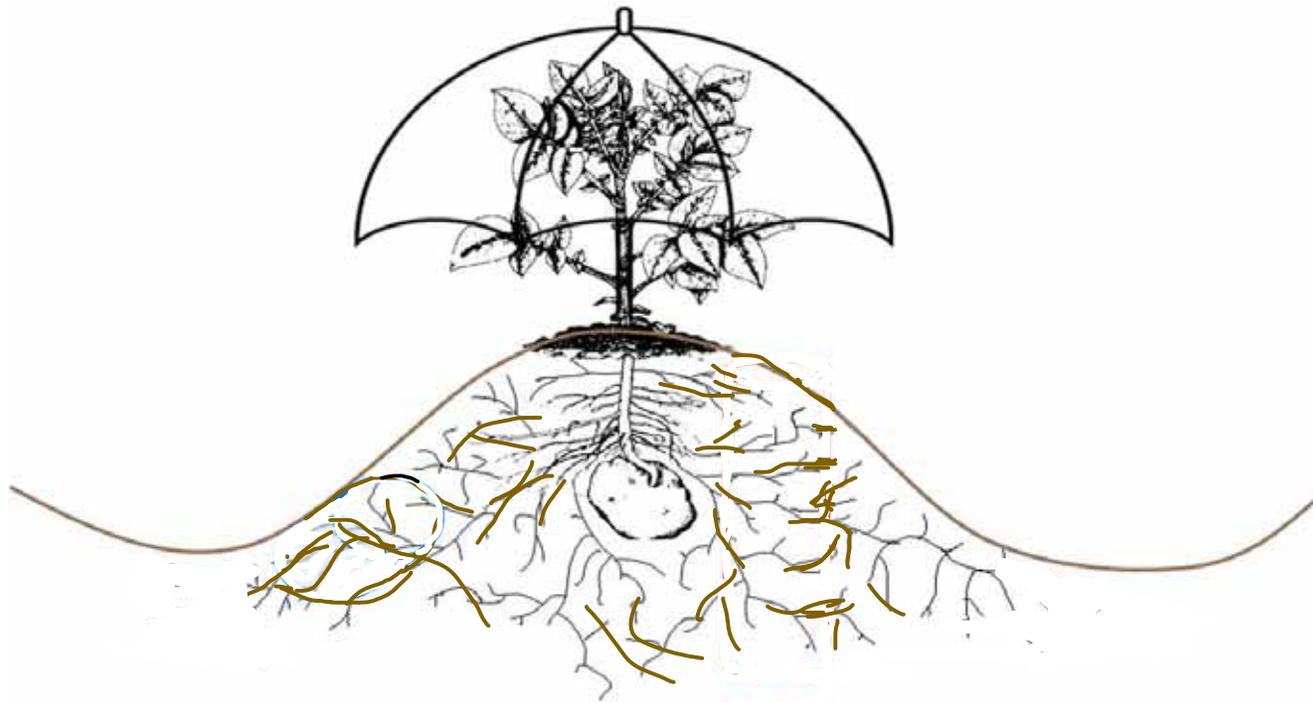
Systeme cultural « Neutre »

- Neutre
 - Peu d'impact sur la direction que prend l'eau apportée
 - Sol nu, paillis perméable



Plante « Parapluie »

- L'eau de pluie ou d'irrigation (aspersion) est détournée du système racinaire par la culture
 - Pomme de terre, tomate, poivron, aubergine



Plante parapluie



Plante « Entonnoir »

- L'eau apportée est dirigée vers le système racinaire
 - Fraisier, zucchini, chou, brocoli, chou-fleur, laitue



Plante « Neutre »

- Peu d'impact sur la direction que prend l'eau apportée
 - Bleuet nain, haricot, oignon, carotte, canneberge



Systeme cultural + Plante « Parapluie »



Combinaisons « Plante-Système cultural » et dynamique de l'eau

		Système cultural			
		Parapluie	Entonnoir	Neutre	
Plante	Parapluie	Pomme de terre	Habituel	Possible	Atypique
		Tomate, poivron, aubergine	Fréquent	Possible	Possible
	Entonnoir	Fraisier à jours neutres	Habituel	Possible	Atypique
		Zucchini	Habituel	Possible	Atypique
		Chou, brocoli, chou-fleur	Possible	Possible	Possible
		Laitue	Atypique	Atypique	Habituel
	Neutre	Haricot	Atypique	Atypique	Habituel
		Bleuet nain	Atypique	Atypique	Habituel
		Oignon, carotte	Atypique	Atypique	Habituel
		Canneberge	Atypique	Atypique	Habituel

Besoin en eau quotidien (maximal)

- Pomme de terre
 - Max.: 5-6 mm
- Fraises à jours neutres
 - Max.: 3 mm
- Mais,...



Difficile de généraliser un besoin en eau ou une consigne pour une culture

- Deux prochains tableaux :
 - Contextes qui sont facilitants / contraignants



Type de sol

Similaire

Similaire

Différent

Différent



Nombre de cultivar(s)/variété(s)

Faible

Élevé

Faible

Élevé



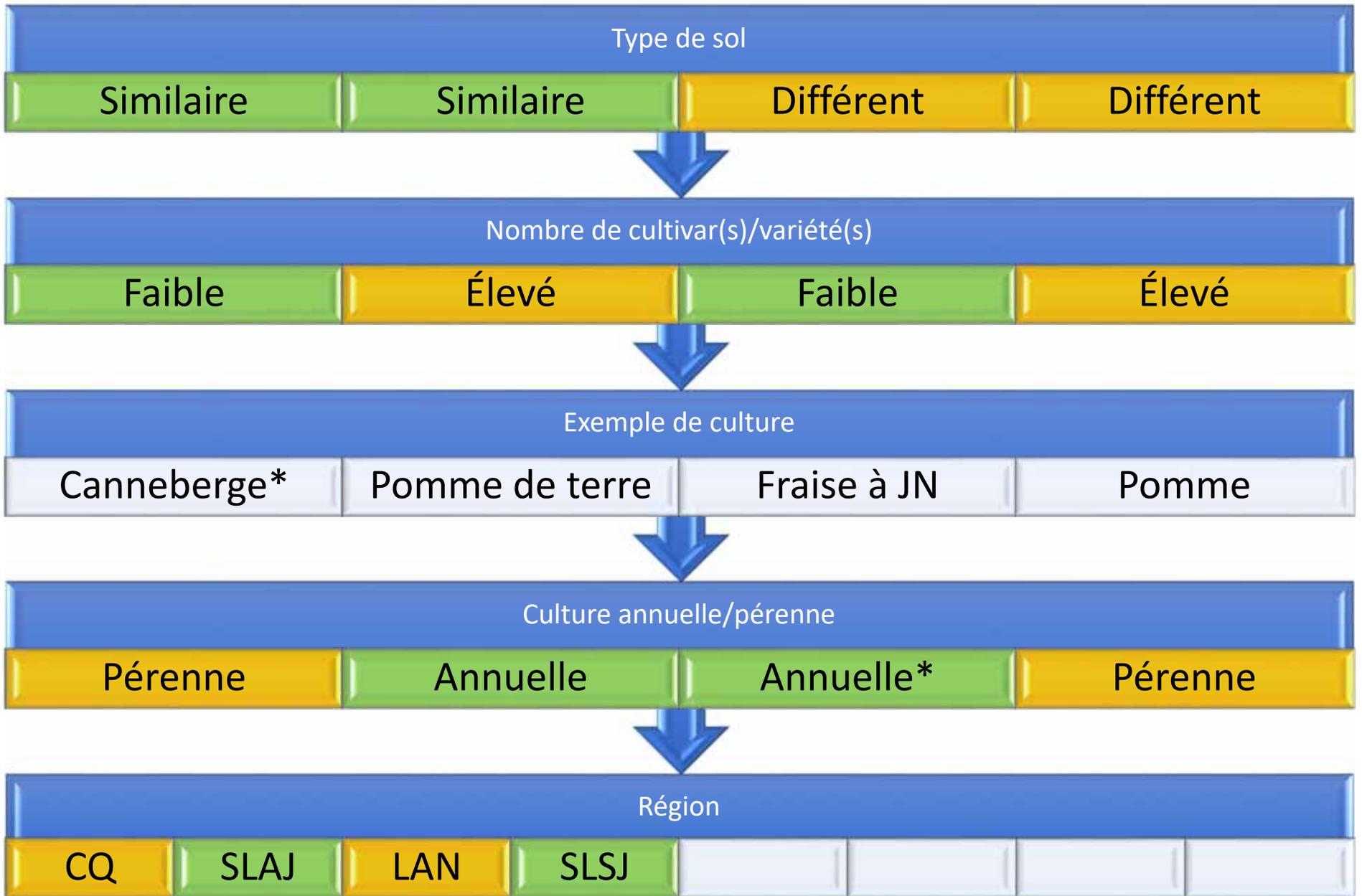
Exemple de culture

Canneberge*

Pomme de terre

Fraise à JN

Pomme



Nombre d'épisodes envisageables

- Région de Québec
 - Pomme de terre (Aspersion: 20 mm/épisode)
 - 10 épisodes : Sable
 - 5 épisodes : Sable loameux et loam sableux
 - 2 épisodes : Loam
 - Fraise à jours neutres (GàG: 1,5 mm/épisode)
 - 60 à 80 épisodes

Volume d'eau nécessaire

- Pommes de terre
 - Hauteur d'eau reçue par la culture : 20 mm

Nombre épisodes (saison)	Hauteur (mm)	Volume m ³		
		1 ha	50 ha	100 ha
2	40	400	20 000	40 000
5	100	1000	50 000	100 000
10	200	2000	100 000	200 000

- Volume et réserve....

Volume d'eau nécessaire

- Fraise à jours neutres
 - Hauteur d'eau reçue par la culture : 1,5 mm

Nombre épisodes (saison)	Hauteur (mm)	Volume m ³		
		1 ha	5 ha	10 ha
60	90	900	4500	9000
80	120	1200	6000	12 000

Périodes critiques...ou compromis?

- Objectifs de l'irrigation :
 - Assurance-récolte, rendement visé, etc.
- Contraintes :
 - Approvisionnement en eau
 - Nombre de jours avant de pouvoir revenir
- Stress va affecter la culture
 - Intensité et durée du stress
 - Moment où il survient
 - ETc min vs max...

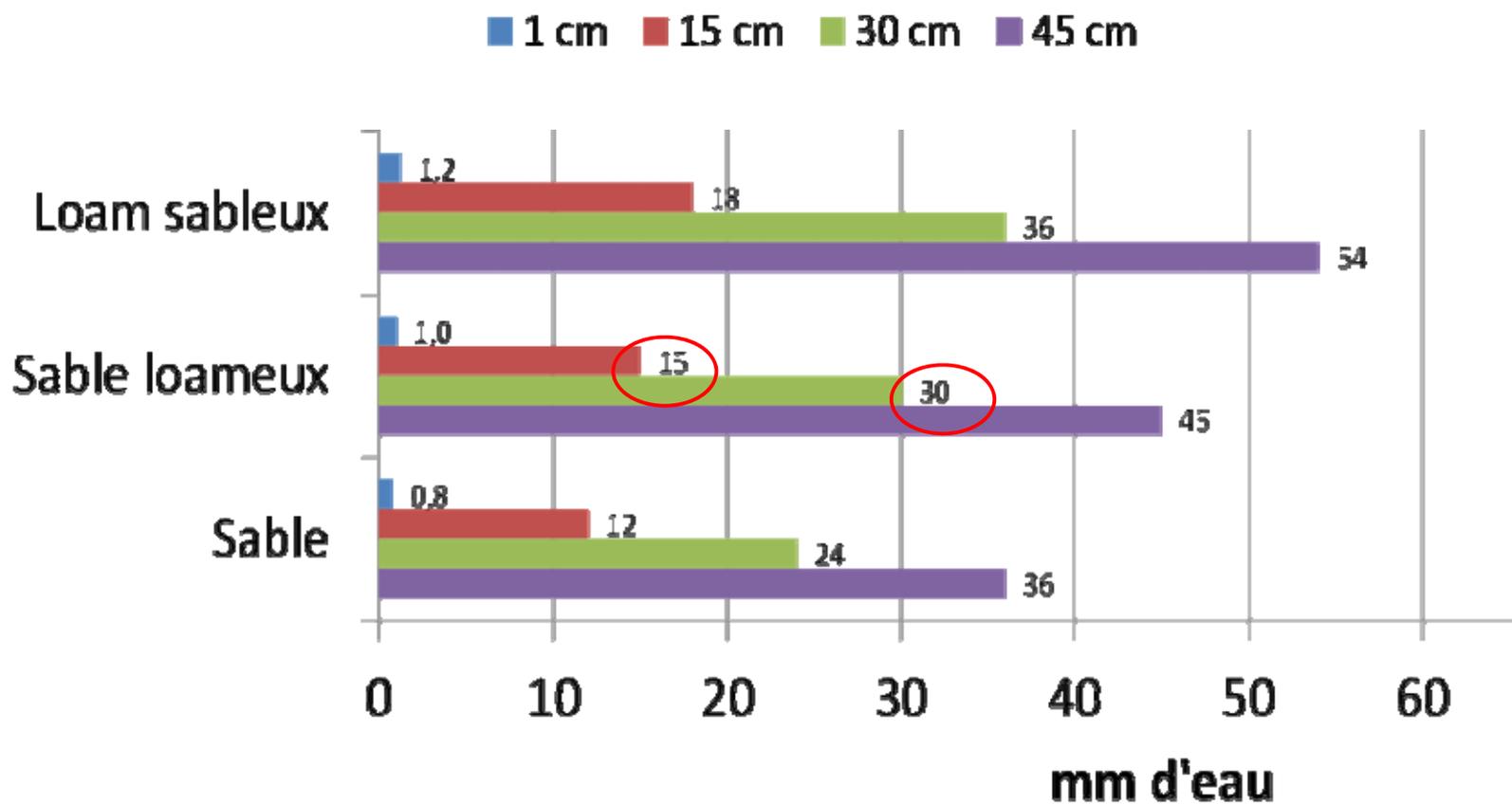


Impacts stress hydriques - PdT

- Établissement
 - Retard émergence, développement racines
- Initiation des stolons
 - Dév. stolons et du nombre, dév. racine, prélèvement des éléments nutritifs
- Initiation tubercules
 - Dév. feuillage et du plant, nombre tubercules
- Grossissement tuber
 - Dév. du plant, calibre tubercules et forme, sénescence hâtive
- Maturité
 - Poids spécifique et calibre des tubercules

Enracinement

- Profondeur
 - Ex.: Sable loameux (à la CC)



Enracinement

- Autres facteurs importants :
 - Savoir où l'eau apportée se « dirige »
 - Carrefour « eau-sol-racine-éléments nutritifs »
 - Impact du système cultural
 - Paillis ...
 - Racines entre rang



En résumé

- Sol: difficile d'intervenir...
- Système cultural
 - Interventions possibles
 - Favoriser l'effet entonnoir, façon d'ancrer le paillis
 - Impacts sur le nombre d'épisodes
- Volume d'eau et réserve en eau
 - Interventions possibles
- Périodes critiques... ou compromis
 - Stress hydrique va avoir un impact sur la culture
 - Pas de stade où la culture peut subir un stress sans impact
 - Si les ressources le permettent...
- Enracinement
 - Interventions possibles:
 - Profondeur et distribution dans le sol

Gestion de l'irrigation

- Les outils
- Choix des outils
- Consigne de déclenchement
- Autonomie en deux apports
- Exemples de régie pour deux cultures

Gestion de l'irrigation

- Les outils
 - Tensiomètres
 - Sondes teneur en eau
 - Bilan hydrique
 - Approche hybride

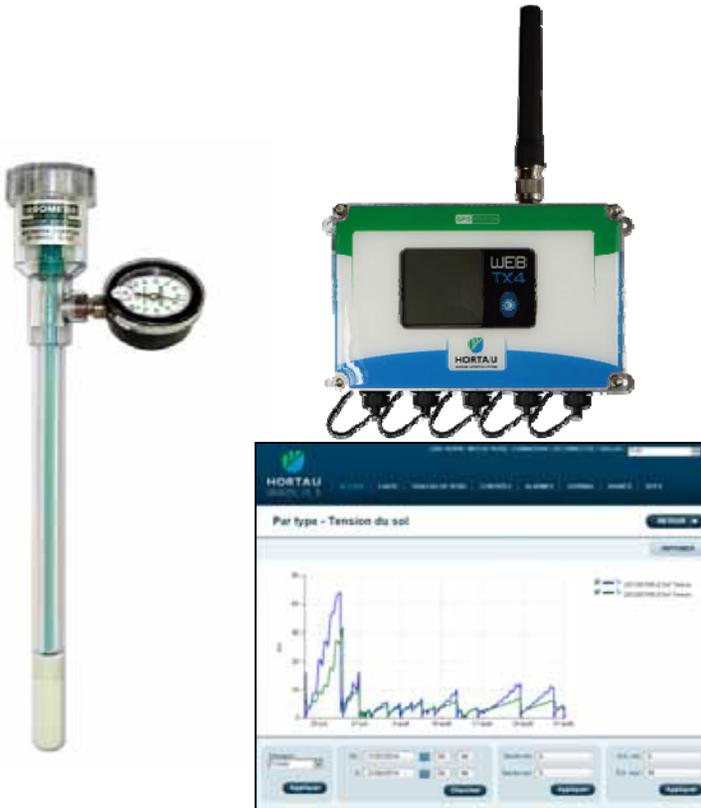


Les outils

- Pourquoi les utiliser?
 - Prévoir le moment de l'irrigation
 - Vérifier que la consigne d'irrigation est atteinte
 - Valider la durée d'un épisode d'irrigation
 - Évaluer l'efficacité des apports en eau (irrigation et pluie)



Tensiomètres



<http://www.irrometer.com/sensors.html#irro>

<http://hortau.com/fr/produits/>



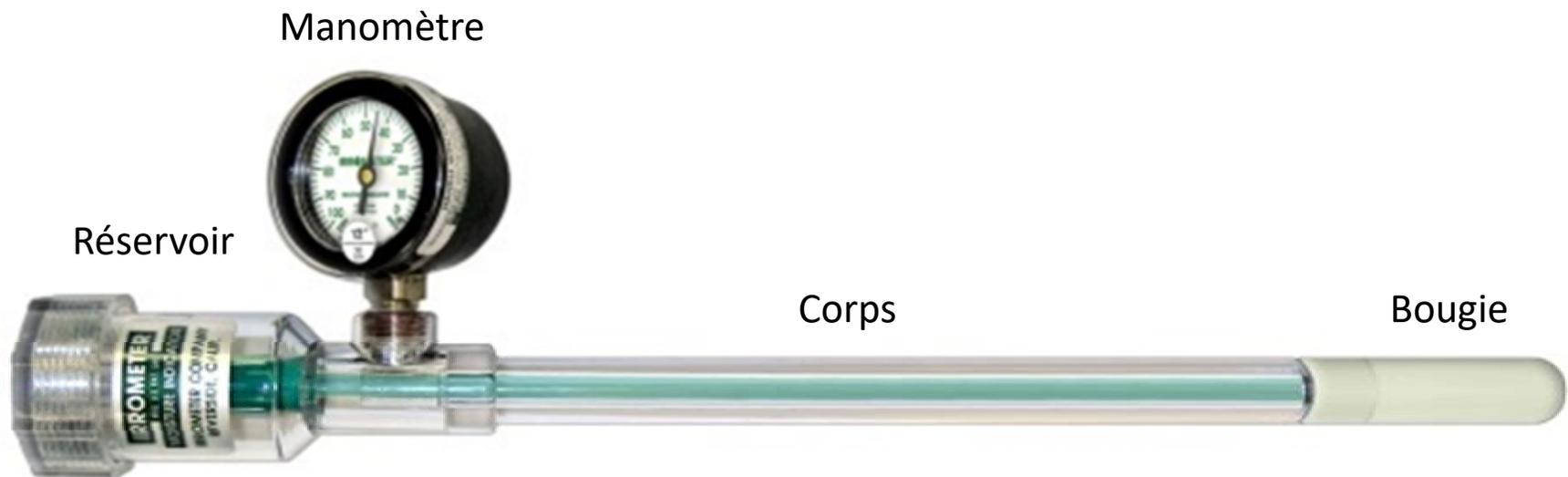
<http://www.irrometer.com/sensors.html#wm>

<http://www.decagon.com/en/soils/water-potential/>



<http://www.soilmoisture.com/Tensiometers/>

- Mesure la force (tension) à laquelle l'eau est retenue par le sol
- Tension (kPa, cBar) ou Potentiel matriciel (m)
- Comment les utiliser?



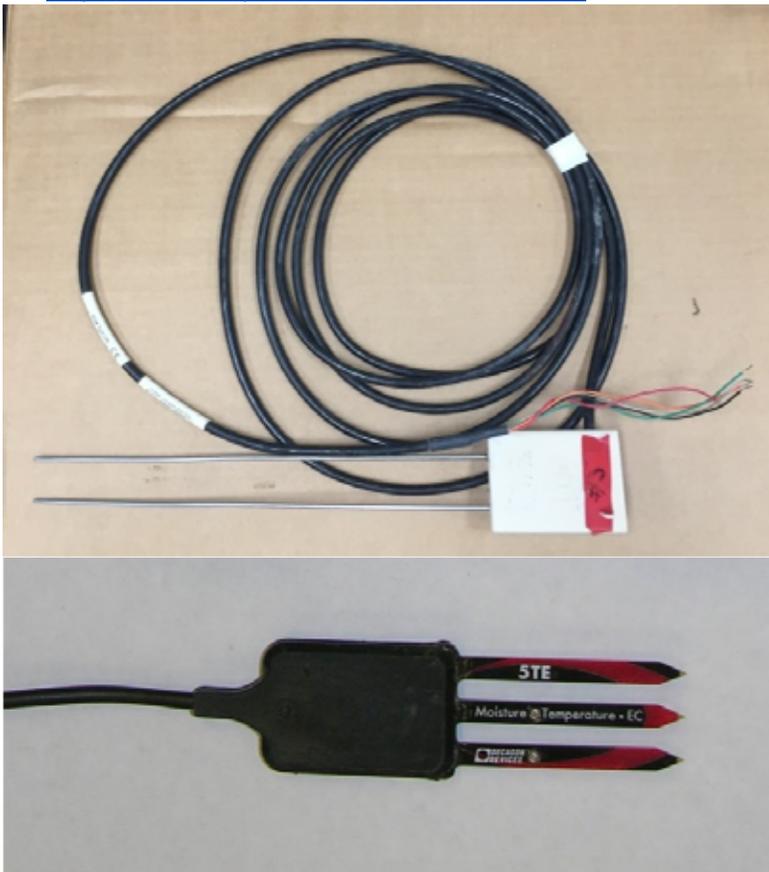
Tensiomètre

Contextes favorables	Contextes défavorables
<ul style="list-style-type: none">• Volume d'eau disponible : Non contraignant• Capacité d'intervenir avec l'irrigation au moment opportun• Objectif d'utiliser la fertigation comme moyen de fertiliser• Automatisation de l'irrigation possible	<ul style="list-style-type: none">• Objectif : Assurance récolte• Sols avec pierrosité importante• Champ hétérogène
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Précision• Facilite identification consigne• Mesurer l'efficacité de la pluie et irrigation• Faible coût*• Communication sans fil possible• Mesure direct	<ul style="list-style-type: none">• Lecture quotidienne• Mesures locales• Difficulté à installer dans un endroit représentatif• Risque élevé de déchargement en sol léger• Fragile

Sondes de teneur en eau

- Teneur en eau volumique ($\text{cm}^3 \text{ eau/cm}^3 \text{ sol}$)

<http://www.campbellsci.ca/soil-water-content>



Contextes favorables

- Recherche et développement

Avantages

- Mesures en temps réel
- Précision
- Robuste
- Fonctionne en conditions de sol très sèches
- Mesurer l'efficacité de la pluie et irrigation

Contextes défavorables

- Contexte production commerciale
- Champ hétérogène

Inconvénients

- Mesures locales
- Communication sans fil moins disponible
- Calibration pour chaque sol

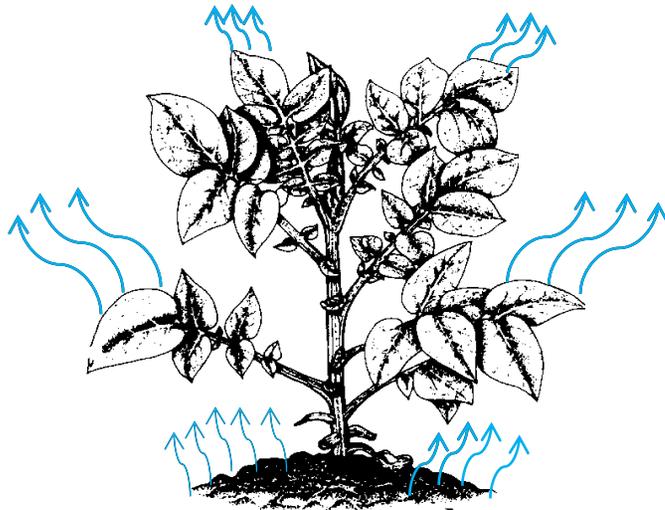


Tensiomètre

- Atelier

Bilan hydrique

- Sol réservoir d'eau
 - Comptabiliser les apports et pertes
 - Apports (irrigations et précipitations)
 - Pertes (Évapotranspiration ou ETp)
 - ETp: Agrométéo
 - $ETc = ETp \times Kc$



Bilan hydrique

- Kc

Tableau 1. Coefficients culturaux (Kc) déterminés selon le site, la période et la saison.

Saison	St-Laurent-de-l'Île-d'Orléans		Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier		L'Isle-Verte		St-Léonard-d'Aston		St-Paul-de-Joliette						
	Période	Kc	Période	Kc	Période	Kc	Période	Kc	Période	Kc					
2015	Mi-saison	06-30 à 07-07	0,9	Mi-saison	06-30 à 07-08	0,7	Hâtive	06-30 à 07-08	*	Mi-saison	06-30 à 07-05	-	Mi-tardive	06-30 à 07-02	0,8
		07-08 à 07-17	*		07-09 à 07-17	1,0		07-09 à 07-17	*		07-06 à 07-17	0,5		07-03 à 07-09	0,9
		07-18 à 08-10	1,1		07-18 à 08-10	*		07-18 à 08-10	0,7		07-18 à 08-10	*		07-10 à 07-31	*
		08-11 à 08-28	0,8		08-11 à 08-28	0,5		08-11 à 08-28	*		08-11 à 08-28	*		08-01 à 08-28	0,5
2016	Mi-saison	06-08 à 06-26	0,8	Tardive	06-08 à 06-22	0,2	Mi-saison	06-08 à 06-23	0,3	Mi-saison	06-08 à 06-24	0,4	Mi-saison	06-08 à 06-23	0,5
		06-27 à 07-13	1,1		06-23 à 07-13	0,8		06-24 à 07-13	0,4		06-25 à 07-13	0,4		06-24 à 07-13	1,0
		07-14 à 07-28	1,0		07-14 à 07-24	1,0		07-14 à 07-28	0,7		07-14 à 07-28	0,6		07-14 à 07-28	0,9
		07-29 à 08-11	0,7		07-25 à 08-06	0,9		07-29 à 08-11	*		07-29 à 08-11	0,4		07-29 à 08-11	0,4
		08-12 à 08-28	0,4		08-07 à 08-28	0,8		08-12 à 08-28	0,6		08-12 à 08-28	0,3		08-12 à 08-28	0,3

* Le nombre de données est insuffisant pour déterminer un Kc.

Exemple

- Sol:
 - Texture : Sable
 - Réserve facilement utilisable à la capacité au champ : 0,7 mm/cm
- Culture:
 - Pomme de terre
 - Profondeur enracinement : 30 cm
 - Réserve facilement utilisable : 21 mm (pour 30 cm)
 - Stade de développement : maximal
 - Kc utilisé : 1
- Consigne établie à 30 kPa ou 21 mm épuisés depuis la recharge du sol à la capacité au champ

Bilan hydrique

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	Etp (mm)	Kc	Etc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
11-août							
12-août							
13-août							
14-août							
15-août							
16-août							
17-août							

Exemple

- ETp :
 - 11 août : 3,3 mm
 - 12 août : 1,2
- Pluie :
 - 11 août : 0 mm
 - 12 août : 35
- Kc : 1

Bilan hydrique

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
11-août	21						
12-août							
13-août							
14-août							
15-août							
16-août							
17-août							

- ETp :
 - 11 août : 3,3 mm
 - 12 août : 1,2
- Pluie :
 - 11 août : 0 mm
 - 12 août : 35
- Kc : 1

Bilan hydrique

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
11-août	21	3,3					
12-août							
13-août							
14-août							
15-août							
16-août							
17-août							

- ETp :
 - 11 août : 3,3 mm
 - 12 août : 1,2
- Pluie :
 - 11 août : 0 mm
 - 12 août : 35
- Kc : 1

Bilan hydrique

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
11-août	21	3,3	1				
12-août							
13-août							
14-août							
15-août							
16-août							
17-août							

- ETp :
 - 11 août : 3,3 mm
 - 12 août : 1,2
- Pluie :
 - 11 août : 0 mm
 - 12 août : 35
- Kc : 1

Bilan hydrique

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
11-août	21	3,3	1	3,3			
12-août							
13-août							
14-août							
15-août							
16-août							
17-août							

- ETp :
 - 11 août : 3,3 mm
 - 12 août : 1,2
- Pluie :
 - 11 août : 0 mm
 - 12 août : 35
- Kc : 1

Bilan hydrique

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
11-août	21	3,3	1	3,3	0	0	
12-août							
13-août							
14-août							
15-août							
16-août							
17-août							

- ETp :
 - 11 août : 3,3 mm
 - 12 août : 1,2
- Pluie :
 - 11 août : 0 mm
 - 12 août : 35
- Kc : 1

Bilan hydrique

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
11-août	21	3,3	1	3,3	0	0	17,7
12-août							
13-août							
14-août							
15-août							
16-août							
17-août							

- ETp :
 - 11 août : 3,3 mm
 - 12 août : 1,2
- Pluie :
 - 11 août : 0 mm
 - 12 août : 35
- Kc : 1

Bilan hydrique

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
11-août	21	3,3	1	3,3	0	0	17,7
12-août	17,7						
13-août							
14-août							
15-août							
16-août							
17-août							

- ETp :
 - 11 août : 3,3 mm
 - 12 août : 1,2
- Pluie :
 - 11 août : 0 mm
 - 12 août : 35
- Kc : 1

Bilan hydrique

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
11-août	21	3,3	1	3,3	0	0	17,7
12-août	17,7	1,2	1	1,2			
13-août							
14-août							
15-août							
16-août							
17-août							

- ETp :
 - 11 août : 3,3 mm
 - 12 août : 1,2
- Pluie :
 - 11 août : 0 mm
 - 12 août : 35
- Kc : 1

Bilan hydrique

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
11-août	21	3,3	1	3,3	0	0	17,7
12-août	17,7	1,2	1	1,2	35	0	
13-août							
14-août							
15-août							
16-août							
17-août							

- ETp :
 - 11 août : 3,3 mm
 - 12 août : 1,2
- Pluie :
 - 11 août : 0 mm
 - 12 août : 35
- Kc : 1

Bilan hydrique

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
11-août	21	3,3	1	3,3	0	0	17,7
12-août	17,7	1,2	1	1,2	35	0	21
13-août							
14-août							
15-août							
16-août							
17-août							

21 et non 51,5 mm

Nous sommes le 17 août

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
11-août	21	3,3	1	3,3	0	0	17,7
12-août	17,7	1,2	1	1,2	35	0	21
13-août	21	4,4	1	4,4	0	0	16,6
14-août	16,6	3	1	3	0	0	13,6
15-août	13,6	4,5	1	4,5	0	0	9,1
16-août	9,1	4,5	1	4,5	10	0	14,6
17-août	14,6	3,1	1	3,1	0	0	11,5

Prévisions pour les jours à venir

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
	...						
17-août	14,6	3,1	1	3,1	0	0	11,5

Prévisions - Bilan hydrique - 3 jours

18-août	11,5	4,5	1	4,5		0	7
19-août	7	5	1	5		0	2
20-août	2	5	1	5		0	-3

Prévisions pour les jours à venir

Historique - Bilan hydrique - 7 jours

Date	Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)	ETp (mm)	Kc	ETc (mm)	Apports en eau (mm)		Estimation hauteur d'eau valorisable (mm)
					Pluie	Irrigation	
	Début journée						Fin journée
	...						
17-août	14,6	3,1	1	3,1	0	0	11,5

Prévisions - Bilan hydrique - 3 jours

18-août	11,5	4,5	1	4,5		0	7
19-août	7	5	1	5			2
20-août	2	5	1	5		0	-3

30 kPa?

Bilan hydrique

Contextes favorables

- Champ hétérogène
- Systèmes d'irrigation par aspersion

Avantages

- Coût par unité de surface
- Prévion du moment où la consigne sera atteinte

Contextes défavorables

- Absence de données météorologiques complètes

Inconvénients

- Approche théorique
- Construction d'un biais possible entre estimation et statut hydrique réel
- Difficile de valider l'efficacité de la pluie

Approche hybride

- Tensiomètres
- Bilan hydrique
- Compromis entre précision et coûts par unité de surface



Approche hybride

Contextes favorables	Contextes défavorables
<ul style="list-style-type: none">• Accès à des valeurs régionales d'ETp• Rétention en eau du sol: Faible à modérée• Champ hétérogène• Systèmes d'irrigation par aspersion	<ul style="list-style-type: none">• Volume d'eau disponible : Contraignant• Fréquence des irrigations : Faible• Champ longitudinal• Absence de données météorologiques complètes
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Coût par unité de surface• Prévision du moment où la consigne sera atteinte• Mesurer l'efficacité de la pluie et irrigation• Anticipation du moment où la consigne sera atteinte• Correction du biais possible avec bilan hydrique seul• Grandes superficies	<ul style="list-style-type: none">• Plus de temps

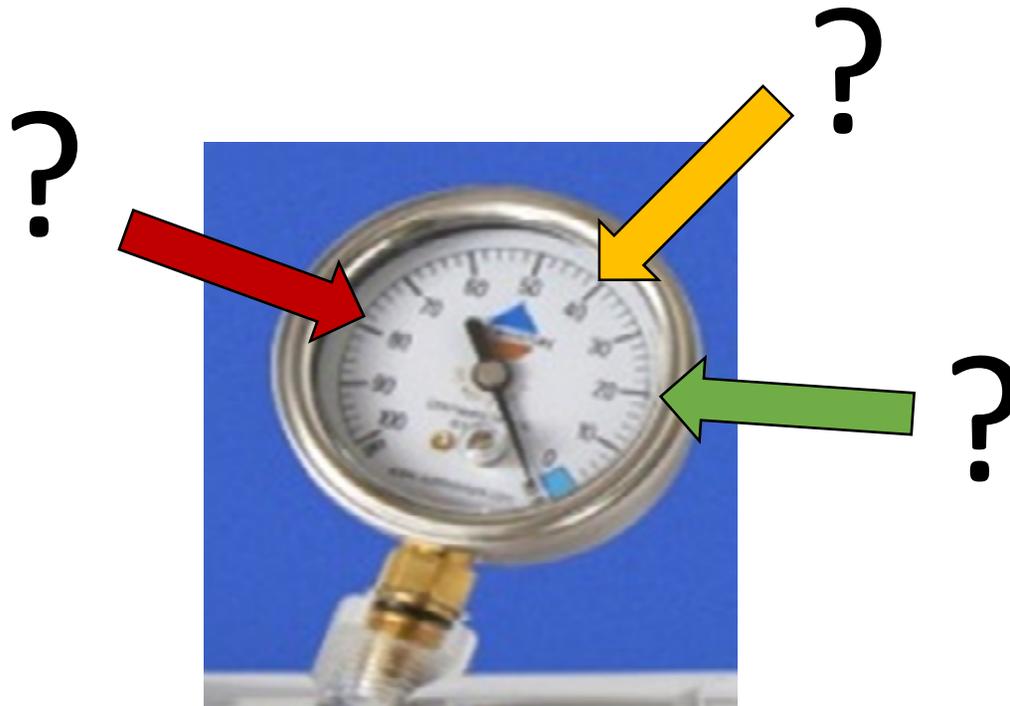
Choix des outils

- Coûts des outils: acquisition, entretien, période d'amortissement
- Taille de l'entreprise
- Importance de l'irrigation dans l'entreprise
- Objectifs de l'irrigation
- Intérêts à modifier la gestion de l'irrigation



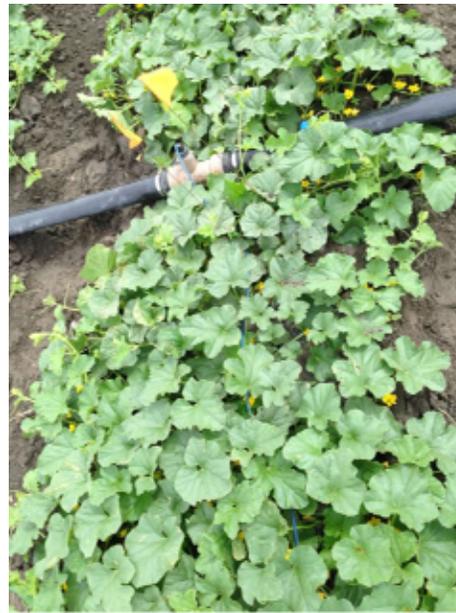
Consigne de déclenchement

- Données de références
- Courbes de désorption en eau
- Détermination *in situ*



Données de références

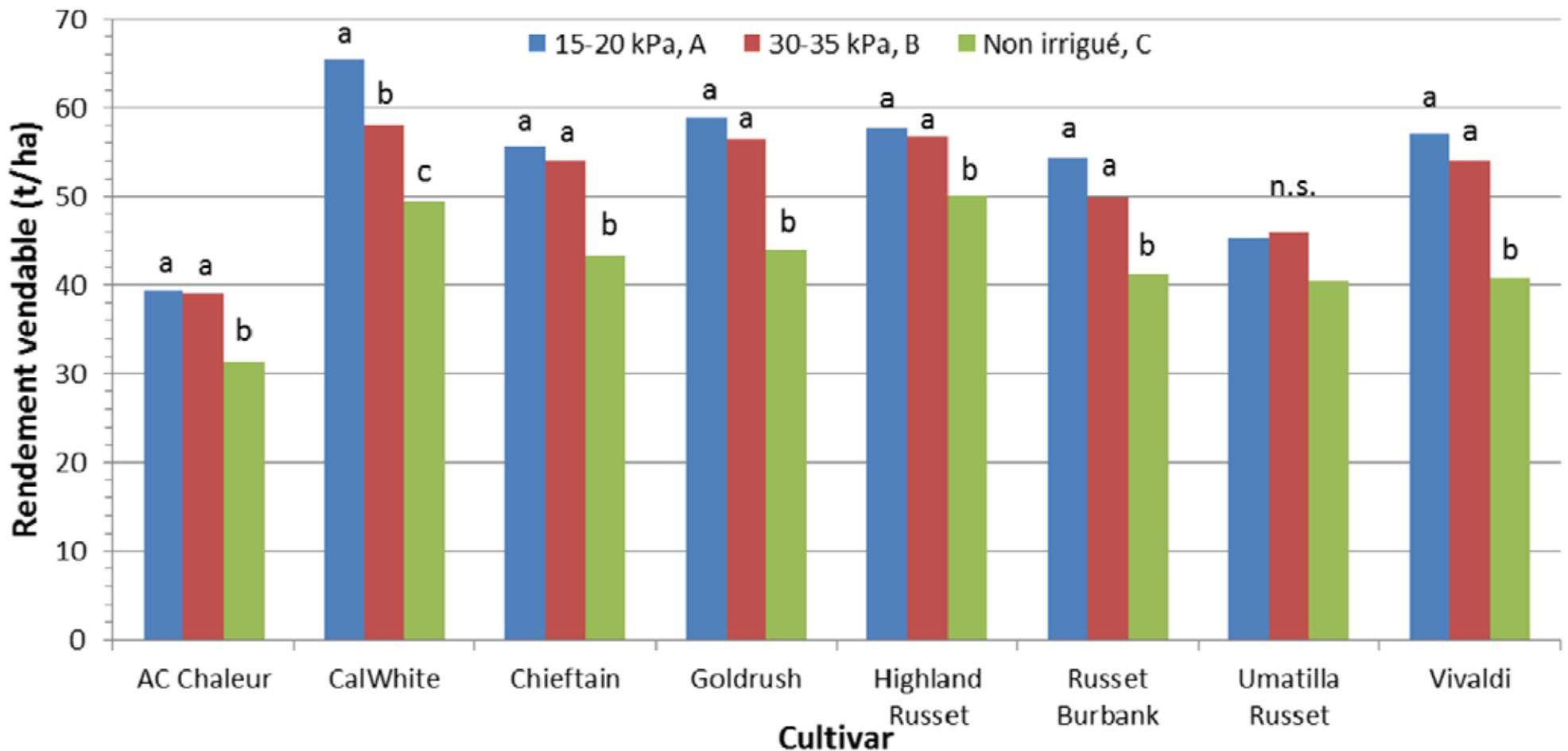
- Grande variation des valeurs dans la littérature
- Varient avec le sol, la région, les cultivars, les stades phénologiques



Culture	Consigne (kPa)	Texture du sol	Région
Brocoli ¹	20-50	Loam limoneux	Colombie-Britannique
Canneberge ²	6,5		Québec
Carotte ¹	30-50		Nouvelle-Écosse
Céleri ¹	10	Loam sableux	Californie
Concombre ¹	15-30	Sable fin, argile sableuse	Finlande
Fraise à jours neutres ^{3,4}	10-18		Québec
Laitue ¹	6-7	Loam sableux	Nouveau-Mexique
Patate douce ¹	25-40	Loam limoneux	Oregon
Pomme ⁴	15-25	Sableux à limoneux	Québec
Pomme de terre ¹	20-60		Oregon
Tomate ¹	10	Sable fin	Floride
Melon d'eau ¹	7-12,6	Loam sableux	Arizona

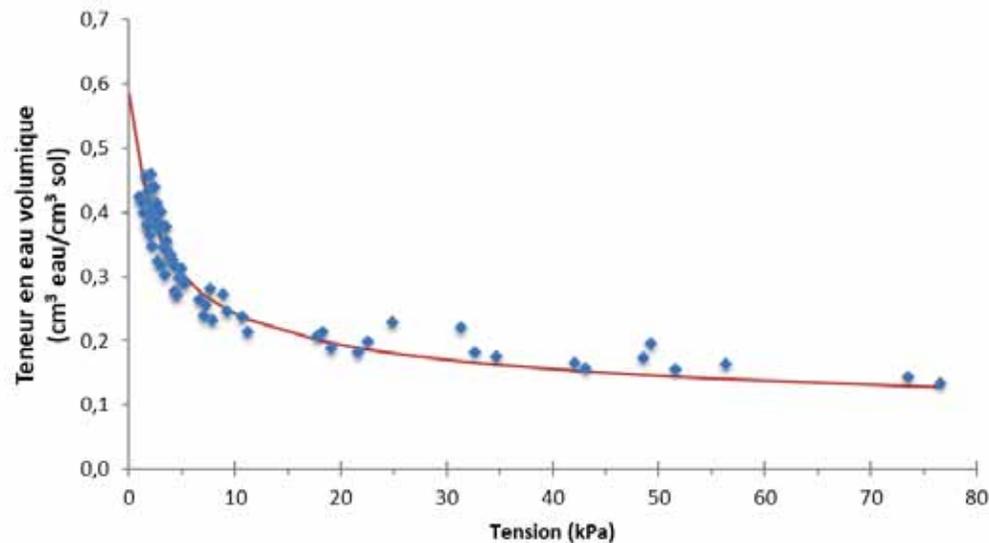
1. Shock et coll. (2013); 2. Bonin (2009); 3. Bergeron (2010); 4. Létourneau et coll. (2015); 5. CRAAQ (2005)

8 cultivars de pommes de terre, 3 consignes



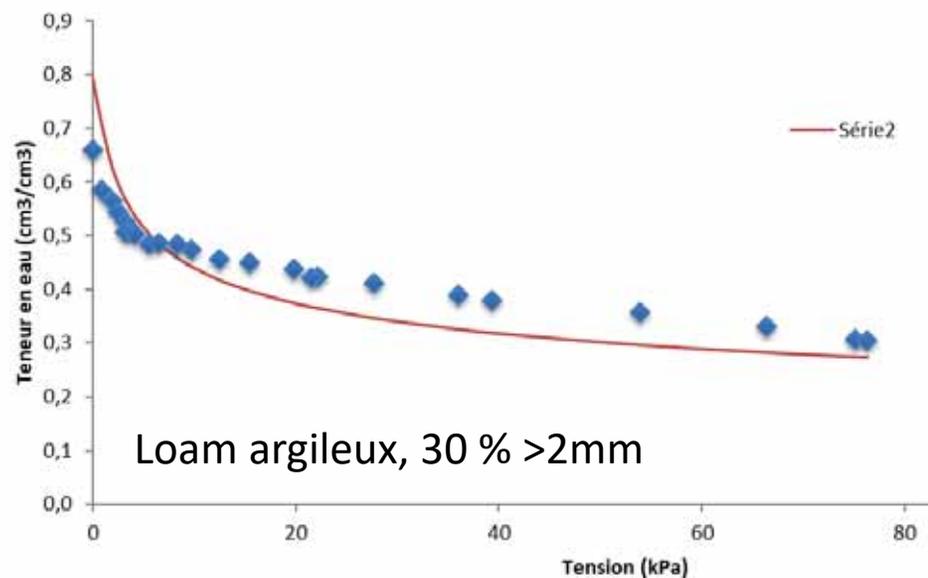
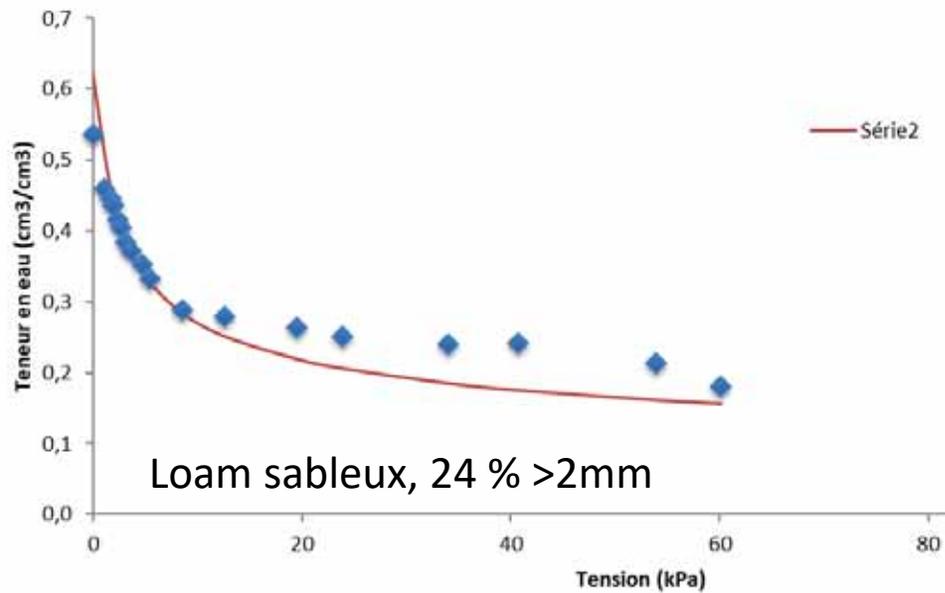
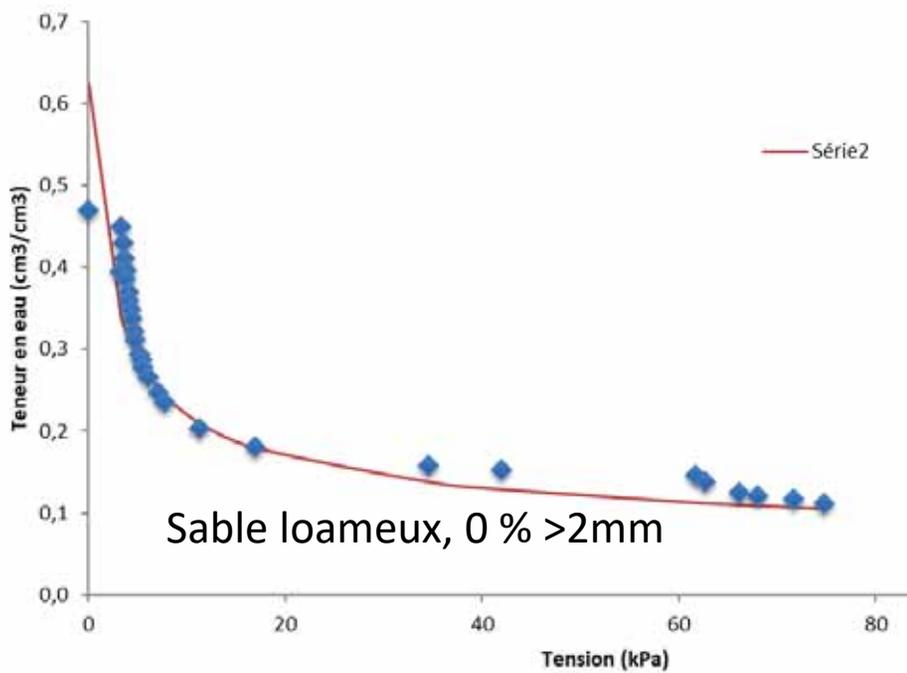
Courbes de désorption en eau

- Relation: Teneur en eau volumique fonction de la tension
- Indique la valeur de tension où l'eau du sol devient difficilement accessible par les prélèvements d'une culture
- Chaque sol a sa courbe (texture, détritiques, densité...)



- Obtenues en laboratoire

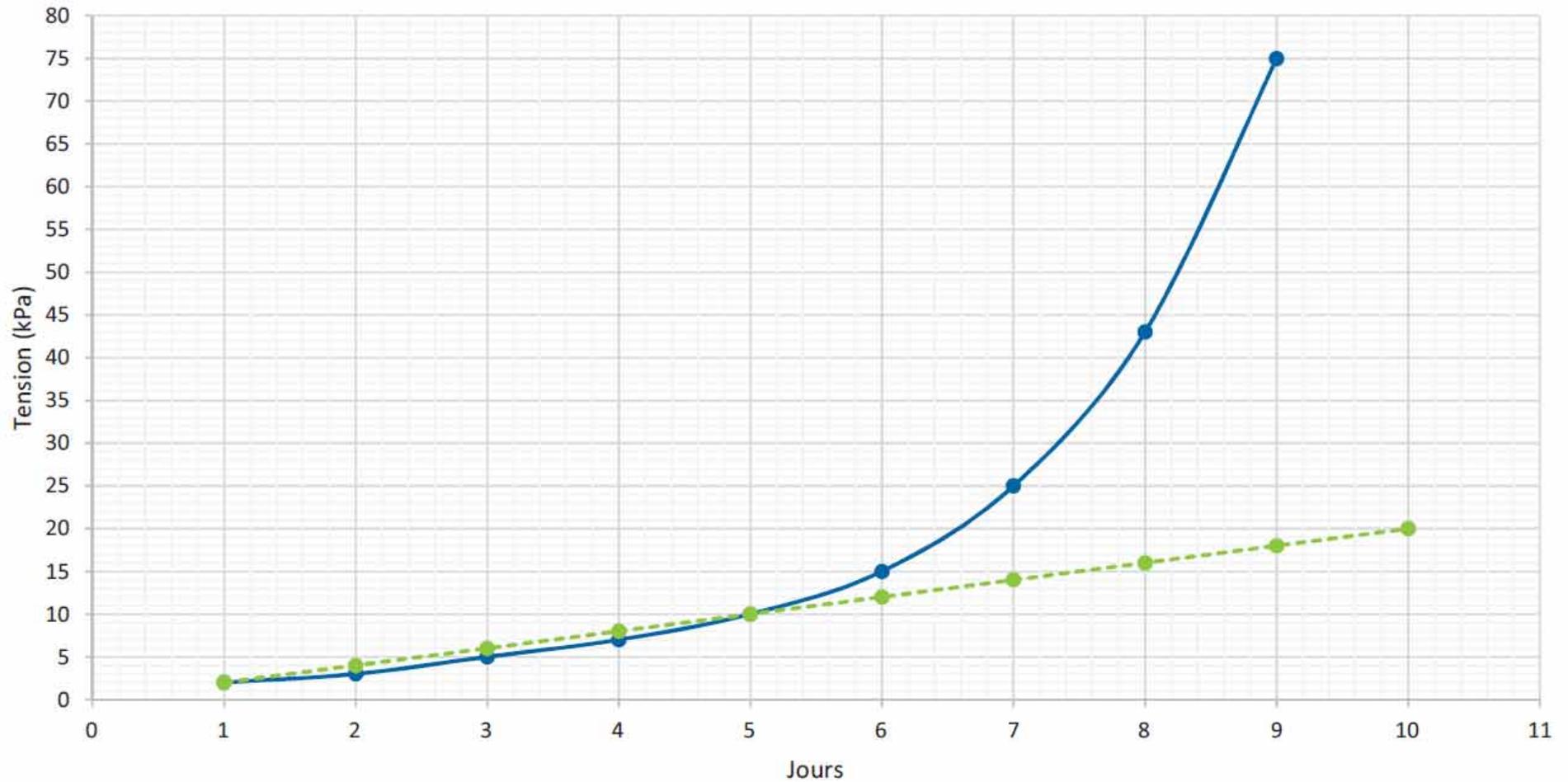




Détermination *in situ*

- Sans utiliser la courbe de désorption
- Trouver le point tournant
- Tensiomètre
- Importance du suivi quotidien
- Lectures aux mêmes heures du jour

Le point tournant



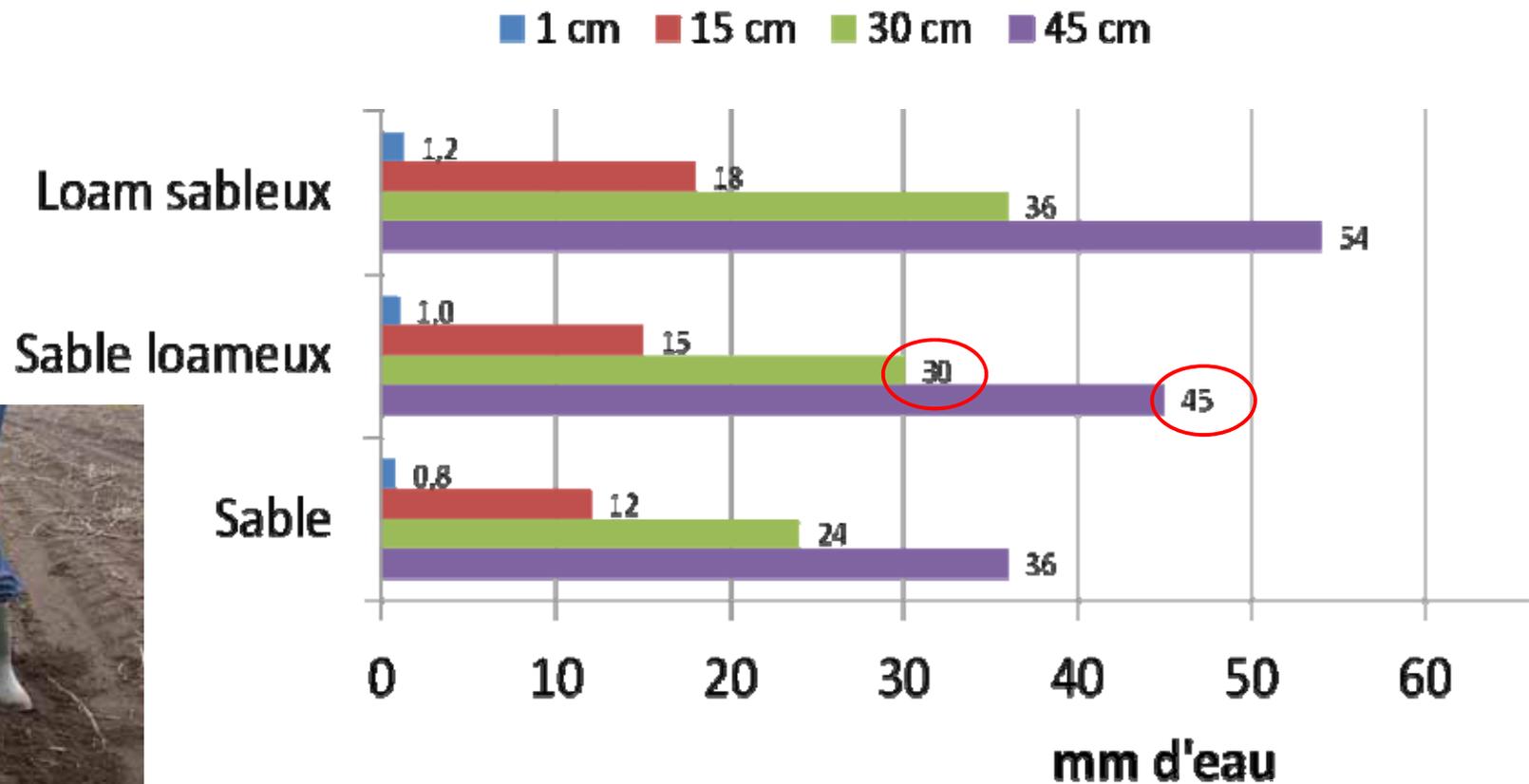
Autonomie du sol entre deux apports

1. Texture et enracinement
2. Superficie visée avec l'irrigation



Texture et enracinement

- Sable loameux (à la CC)
 - Si prélèvement de 3 mm/jour...



Superficie visée avec l'irrigation

- Combien de jour(s) avant de pouvoir irriguer à nouveau un champ?
 - Systèmes mobiles
 - Capacité de l'unité de pompage
 - Compatible avec l'autonomie?
- Réaliste avec le volume d'eau disponible?
 - Si non:
 - Affecte le(s) objectif(s) de l'irrigation?

Exemples de régies

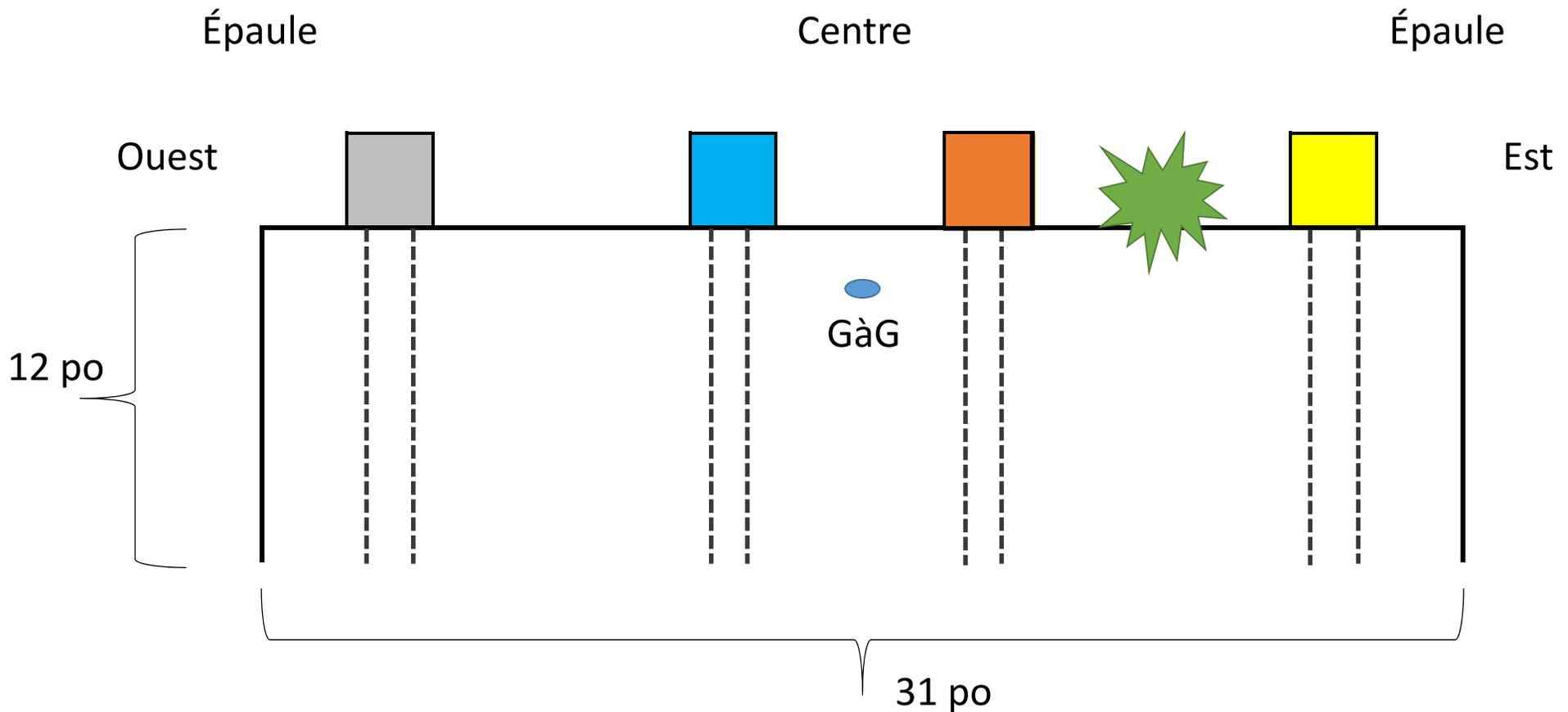
1. Fraise à jours neutres
2. Pomme de terre



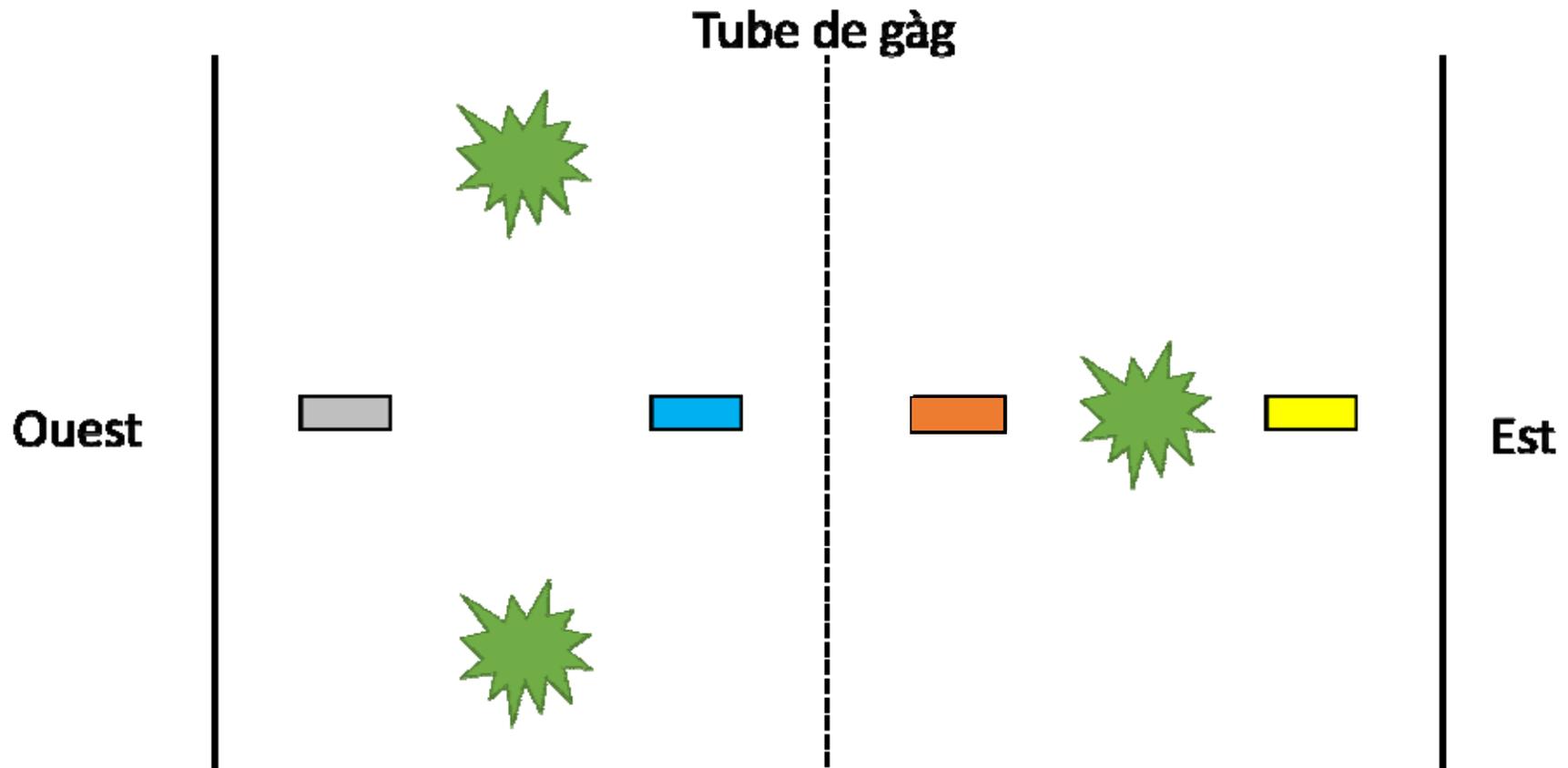
Connaître le mouvement de l'eau



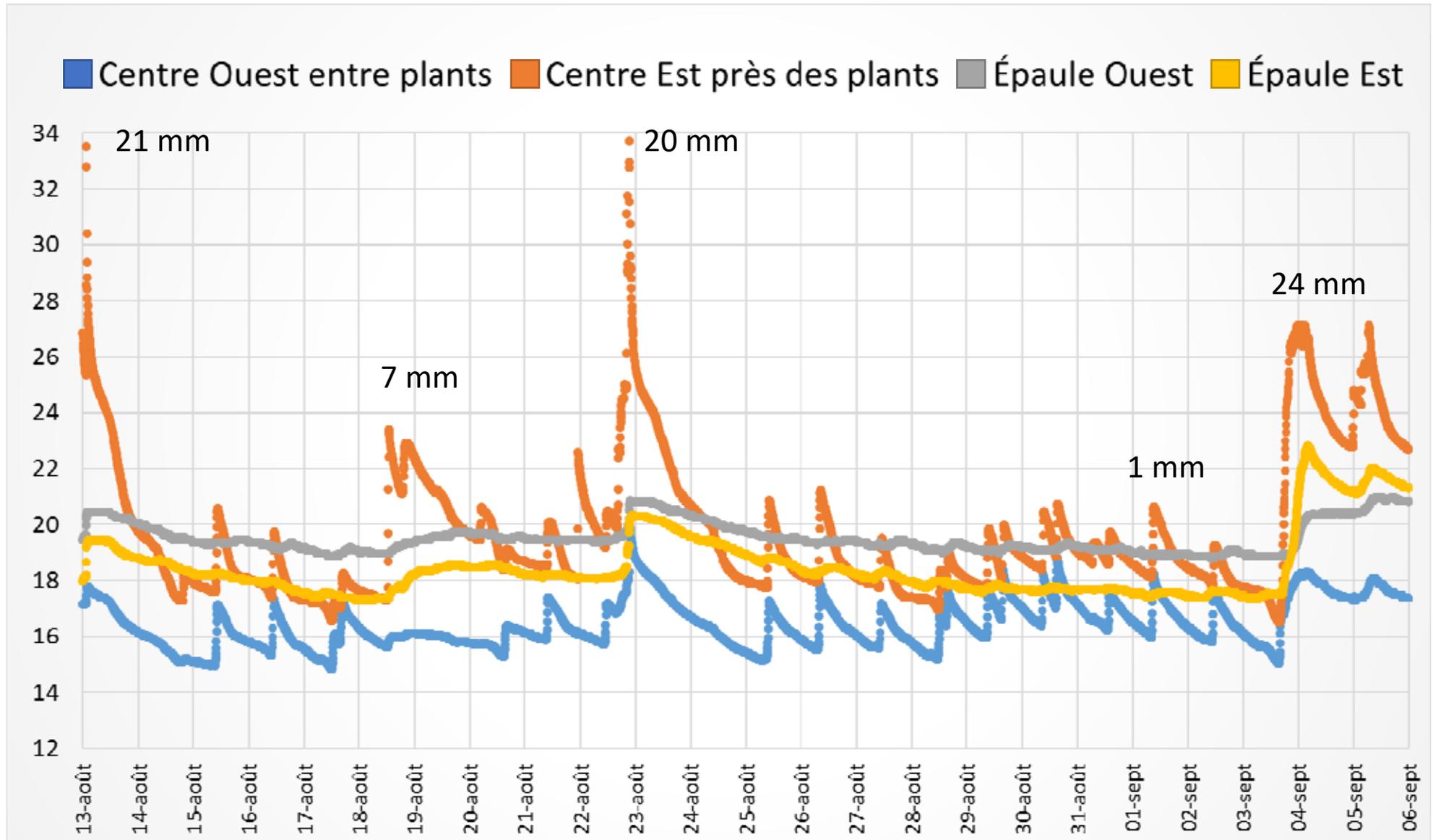
Zones suivies dans la butte (TDR)



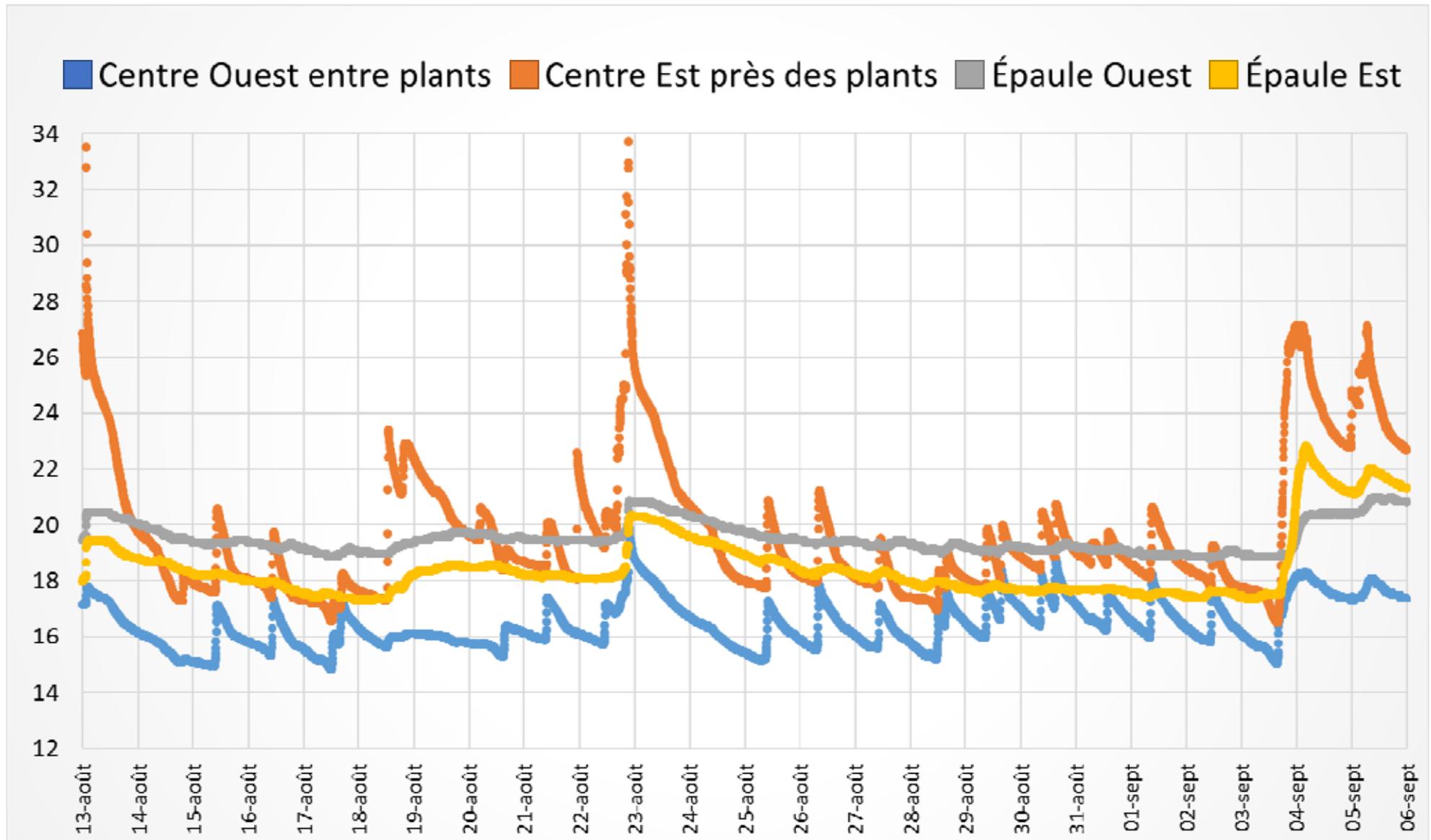
Zones suivies dans la butte (TDR)



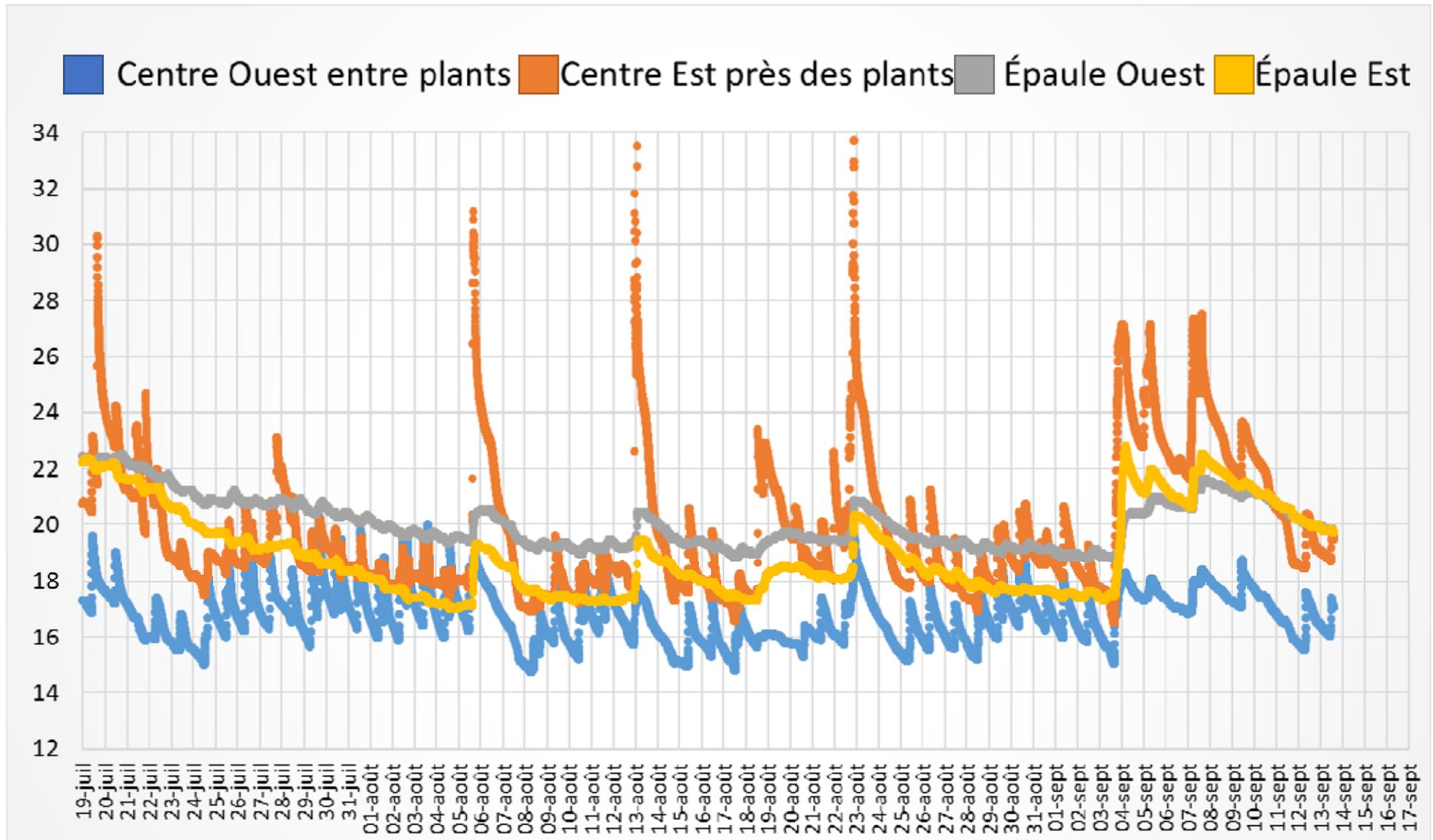
Pluie vs irrigation



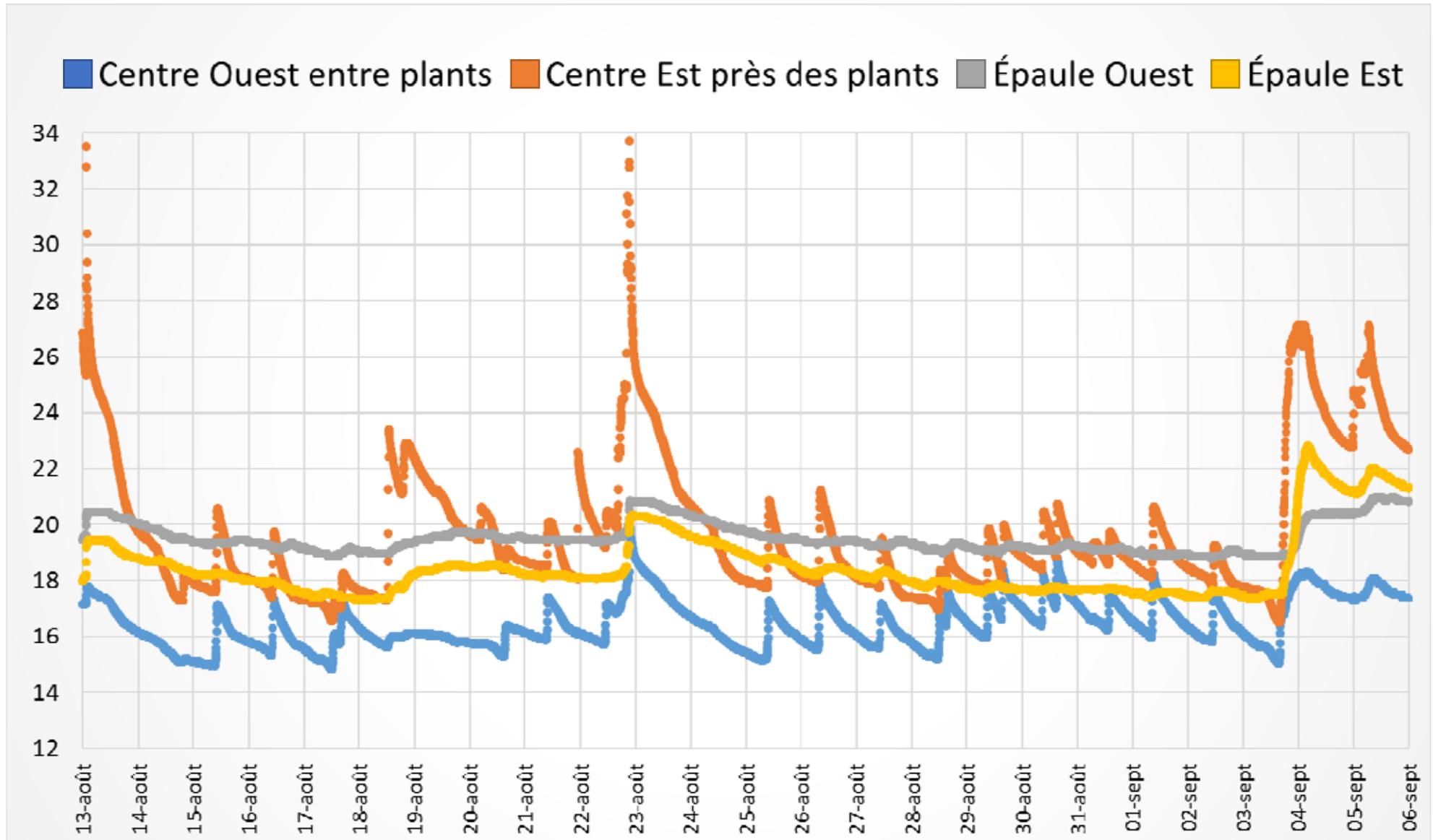
Épaules vs centre



Assèchement des épaules



Régie d'irrigation



Autonomie entre deux apports

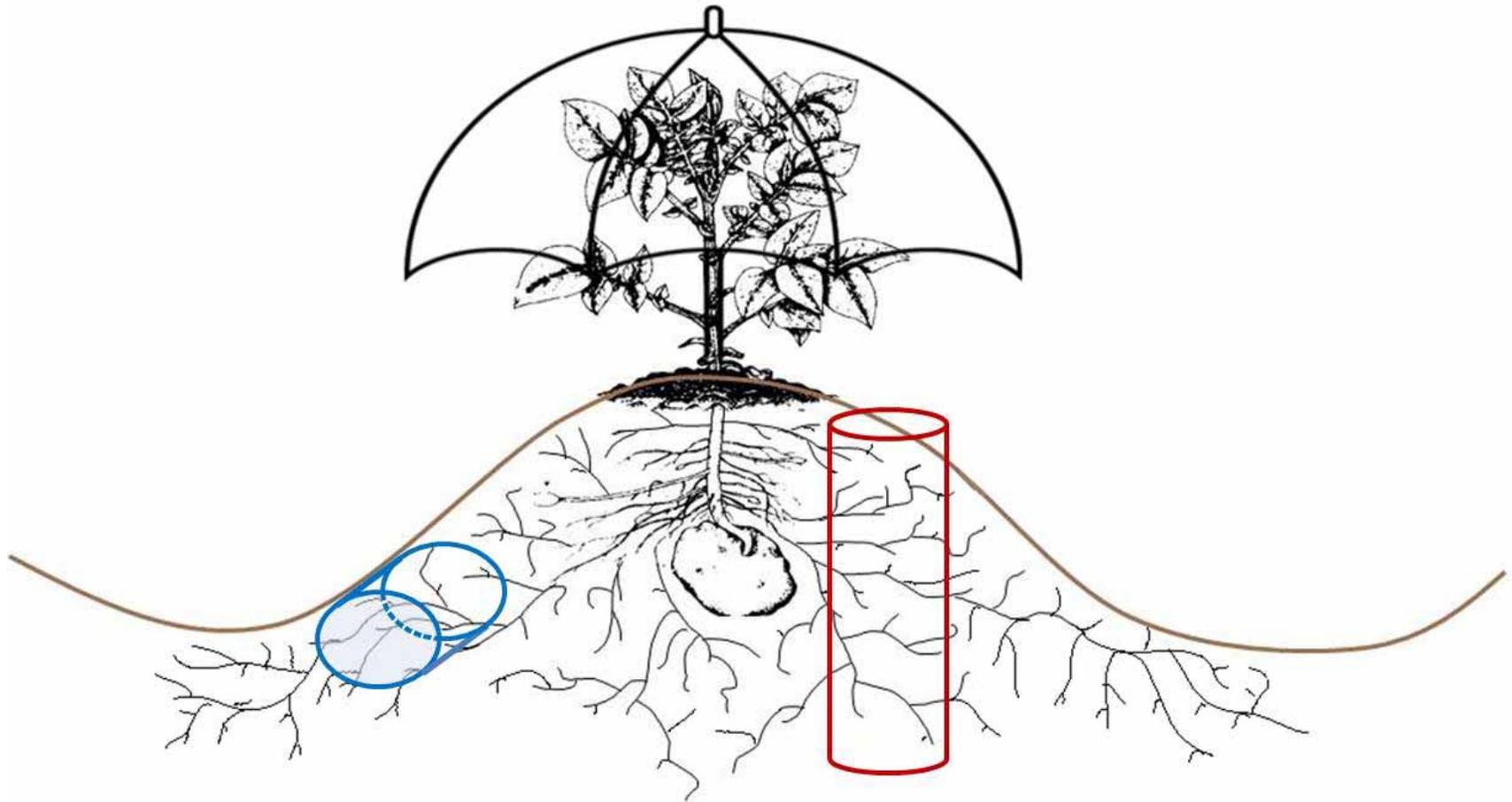
- Système butté irrigué par goutte à goutte
 - Départ : Consigne
 - Ensuite :
 - En absence de pluie et développement max
 - : 1 à 2 irrigation(s) quotidienne(s)
 - Si précipitations : évaluer impact
 - Épaules surtout réalimentées par la pluie
 - Plus une période sans pluie est longue, plus la réserve « globale » diminue = autonomie diminue
 - Durée par épisode: temps pour appliquer 1,5 mm

Capsule vidéo

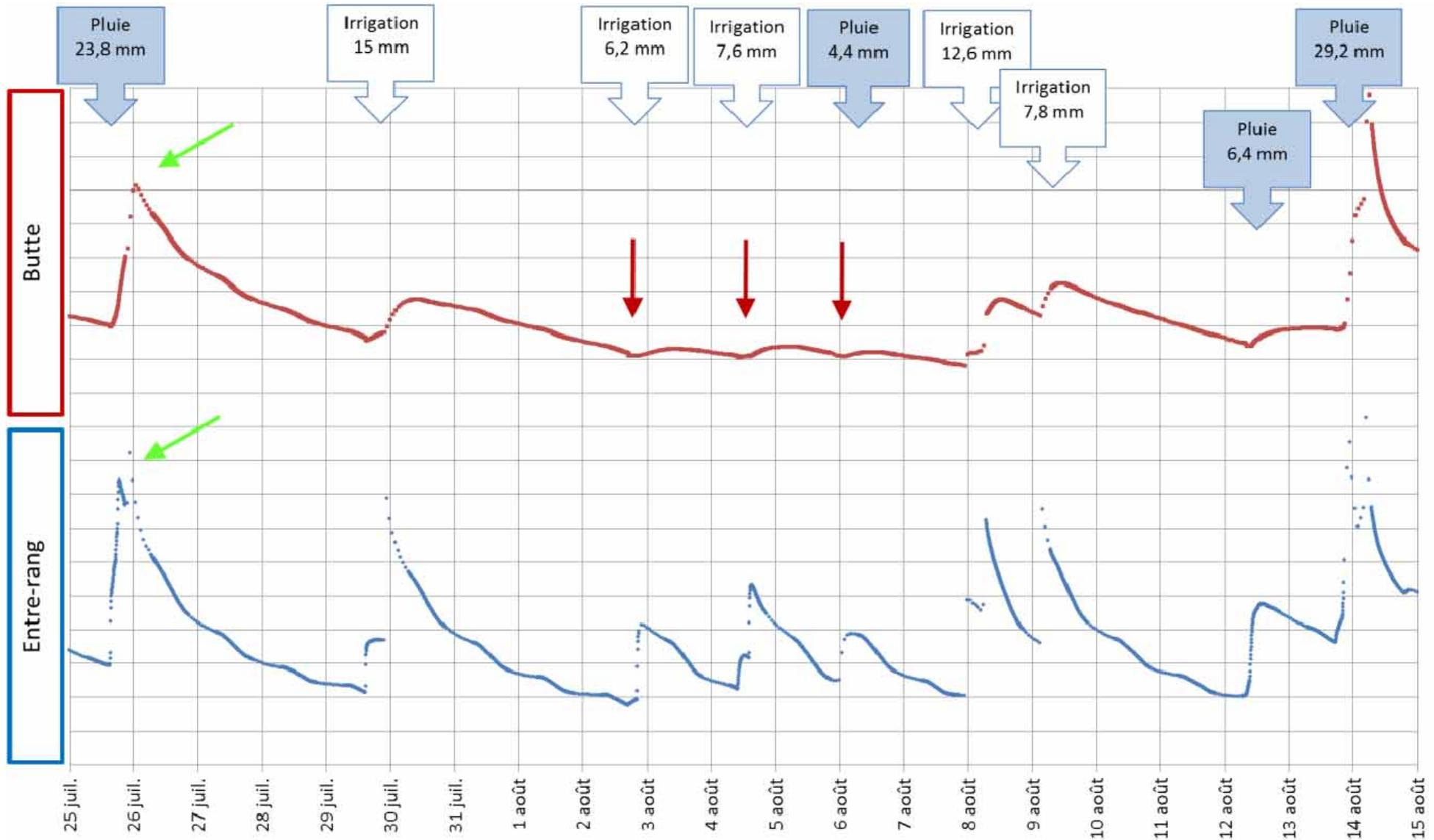
- Installation d'un tensiomètre (fraise)



Connaître le mouvement de l'eau



Hauteur d'eau et zones atteintes



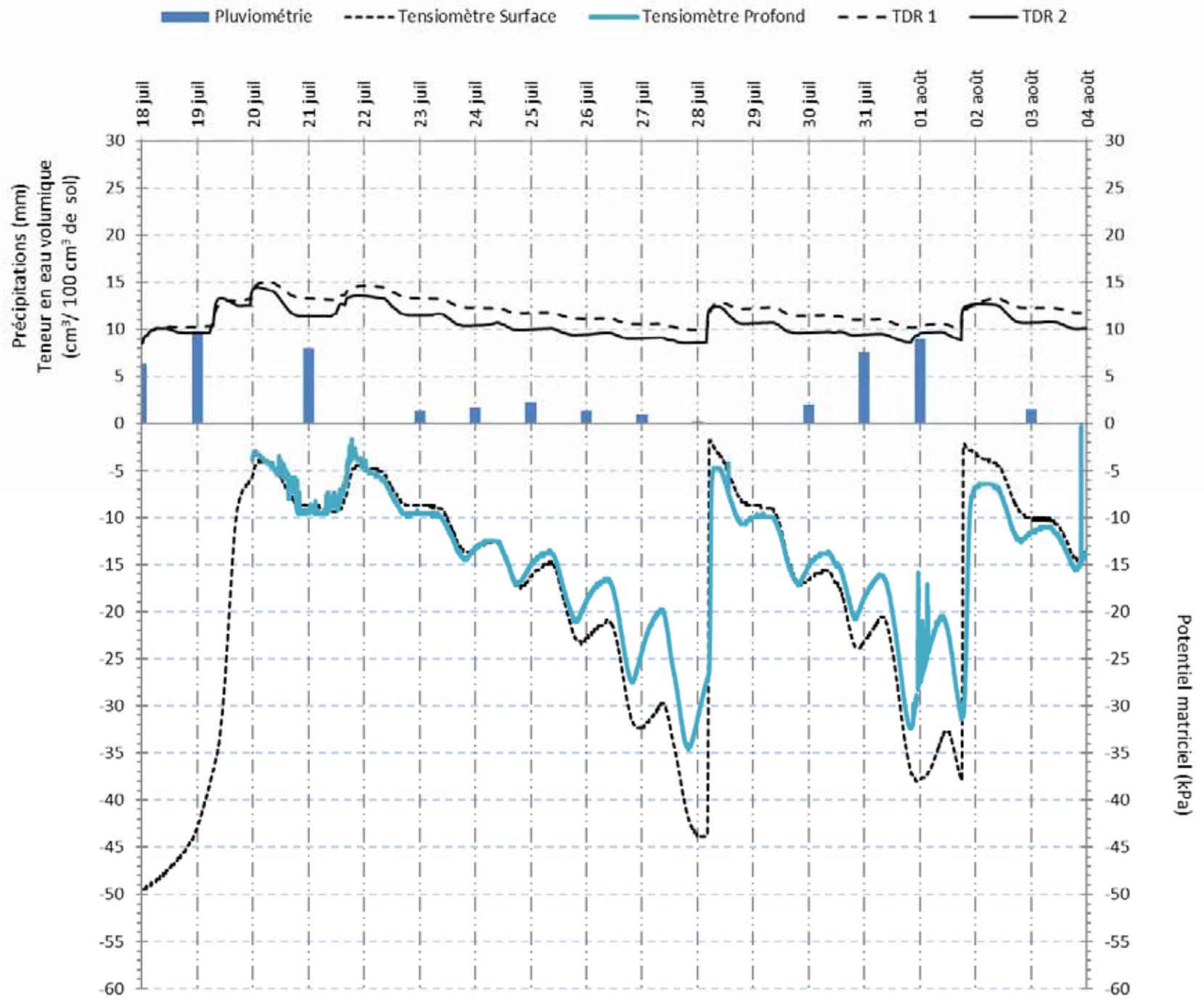
Hauteur d'eau et zones atteintes

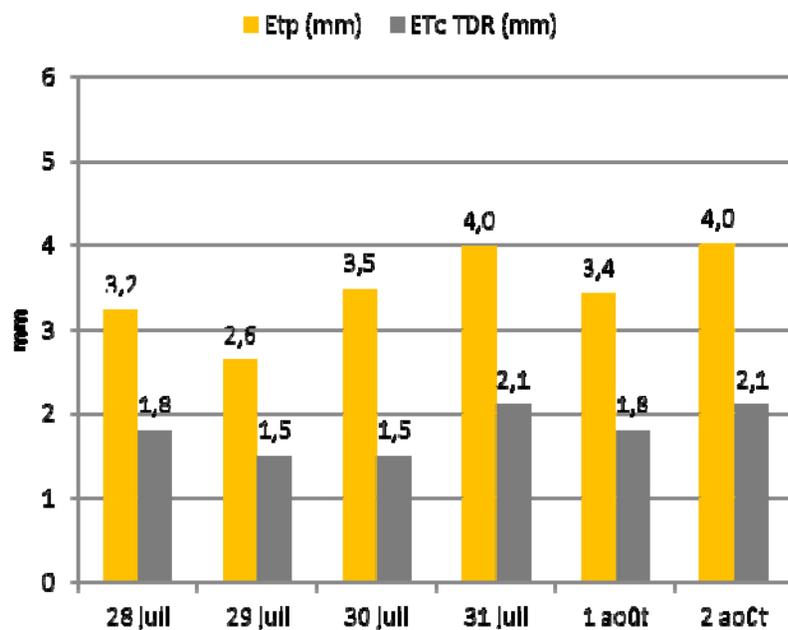
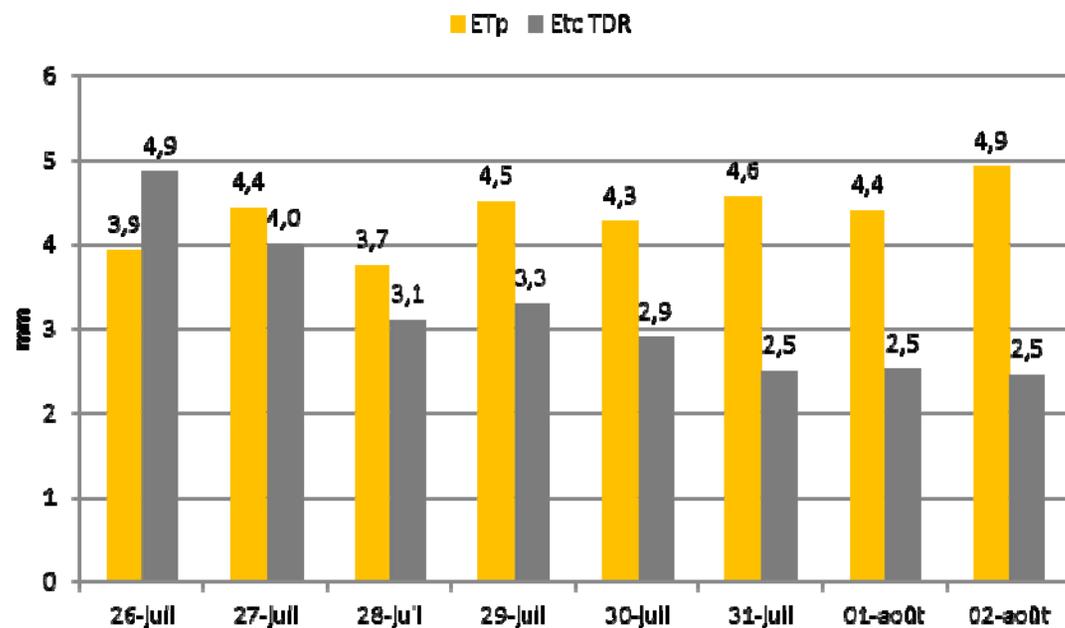
- Effet parapluie accentué par un sol sec
 - Hydrophobe
- Stratégies possibles (pivot)
 - Compléter une faible pluie avec de l'irrigation
 - Fractionner l'apport en 2 épisodes
 - Ex.: 5 et 15 mm

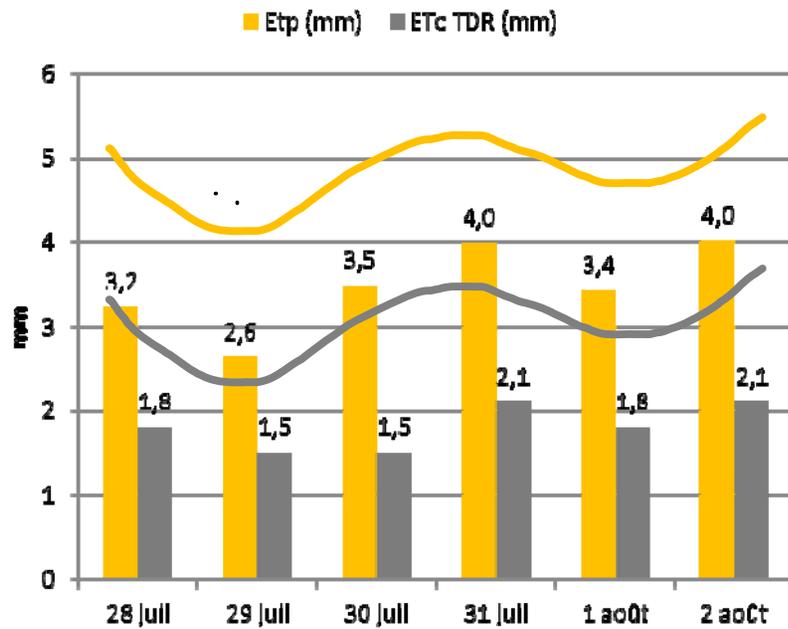
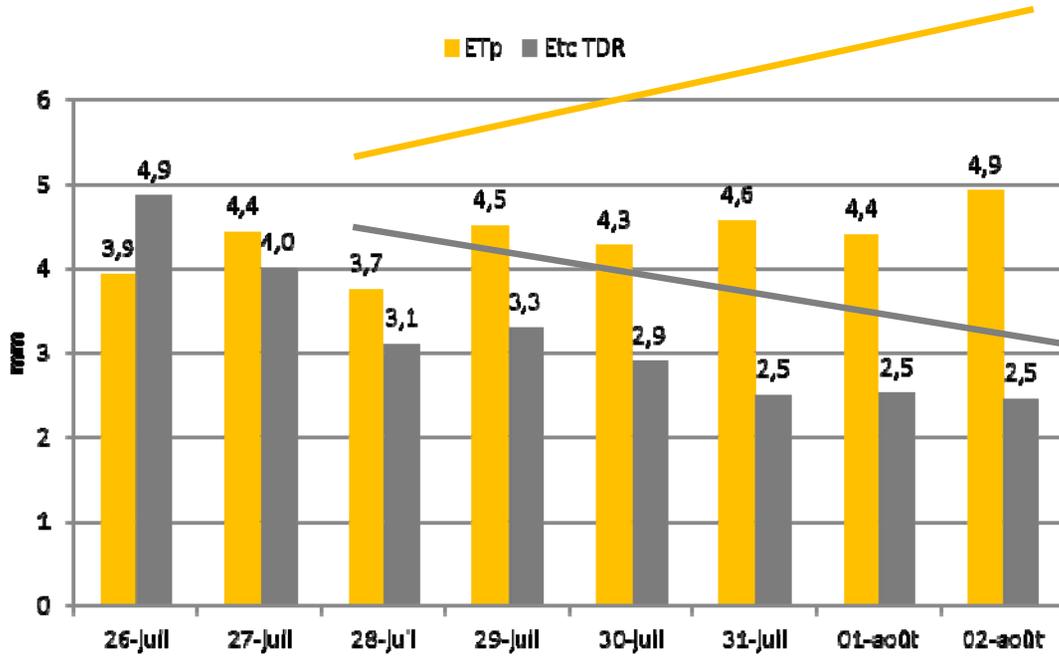
Autonomie entre deux apports

- Affectée par:
 - Texture du sol
 - Profondeur et étendue du système racinaire
 - Stade développement
 - Cultivars/variétés
 - Conditions météorologiques

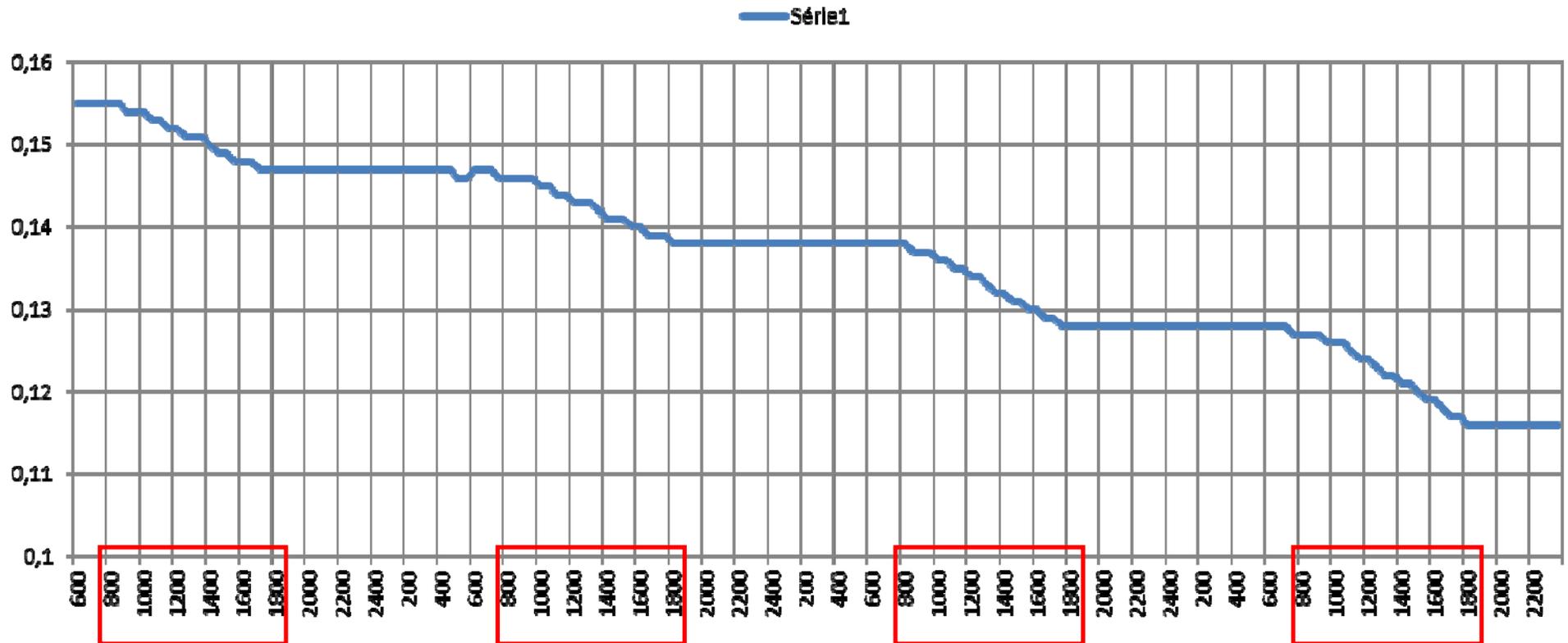








Période de prélèvement (PdT)



Moment idéal pour irriguer?

- Éviter :
 - D'intervenir en absence de prélèvement par la culture
 - De mouiller le feuillage la nuit
 - Présence de vent
- Généralement:
 - Les cultures prélèvent durant le jour
 - Vitesse du vent: jour > nuit



Moment idéal pour irriguer?

- Compromis...
 - Système par goutte
 - Le vent n'a pas d'impact
 - Irriguer durant le jour
 - Certains systèmes par aspersion
 - Sensibles au vent
 - La nuit...
 - Attendre le plus près possible de la levée du jour

Capsule vidéo

- Installation d'un tensiomètre (pomme de terre)

Performance d'un système d'irrigation

- Pourquoi s'en préoccuper
- Comment la mesurer
- Exemple de diagnostics réalisés
- Analyse pré-diagnostic
- Pressure-Drop

Programme d'appui au développement de l'agriculture et de
l'agroalimentaire en région
Projet no. 1516-4051-013QC

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

Rapport présenté au :
Réseau de lutte intégrée Orléans inc. (RLIO)



**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**



Rédigé par :
Stéphane Nadon – IRDA
Daniel Bergeron – DRCN MAPAQ
Carl Boivin – IRDA
Jérémie Vallée – IRDA

Mars 2016

Pourquoi s'en préoccuper

- Hauteur d'application souhaitée et réelle
 - Validation des chartes théoriques (lorsque disponibles)
 - Peut être très variable
- Uniformité d'application de l'eau
 - Éviter l'excès ou le manque d'eau (peut expliquer parfois la variabilité des rendements)
 - Critique lorsqu'il y a fertigation
- Optimisation (temps, \$ et ressources)

Liste du matériel pour le diagnostic

Aspersion

- Piquets de bois
- Gobelets de plastique
- Rondelle de PVC
- Gros élastiques
- Cylindres gradués de 100 ml et 1000 ml
- Chaîne arpenteur
- Entonnoirs
- Masse, pelle, niveau
- Anémomètre avec acquisateur

GAG

- Débitmètre
- Chaîne d'arpenteur (ou roue à mesurer)
- Ruban à mesurer
- Plan du système d'irrigation
- Poinçon éjecteur
- Lunettes de sécurité
- Bouchons réparateurs « goof plug »
- Ensemble de tube de Pitot et manomètre (0-30 psi)
- Gobelets de plastique
- Matériau de type bas de nylon
- Lame tranchante
- Ruban adhésif
- Piquets ou drapeaux
- Tissus absorbants

Diagnostiquer un système d'irrigation par aspersion - Méthodologie

Indice de l'uniformité de la distribution d'eau (DU)

Méthode du premier quartile

- $DU_{pq} = \frac{\text{moyenne des hauteurs d'eau du premier quartile}}{\text{moyenne des hauteurs d'eau totales}}$
- Un DU d'environ 0,70 est jugé comme acceptable

Distribution de l'uniformité – systèmes GàG

$$DU_{Global} = DU_{Débit} \times DU_{colmatage} \times DU_{Drainage} \times DU_{espacement}$$

$DU_{débit} \rightarrow DU_{pression}$

$DU_{colmatage} \rightarrow$ pour les systèmes permanents

$DU_{drainage} \rightarrow$ champs avec forte pente

$DU_{espacement} \rightarrow$ négligeable car, en général, la densité de la culture et le modèle de gàg utilisé est uniforme à travers les champs

Barème d'uniformité pour les systèmes gàg (ITRC, 2015).

- $DU \geq 0,95 =$ Excellent;
- $DU \geq 0,88 =$ Bon
- $DU \geq 0,75 =$ Typique des systèmes gag





test



test



test











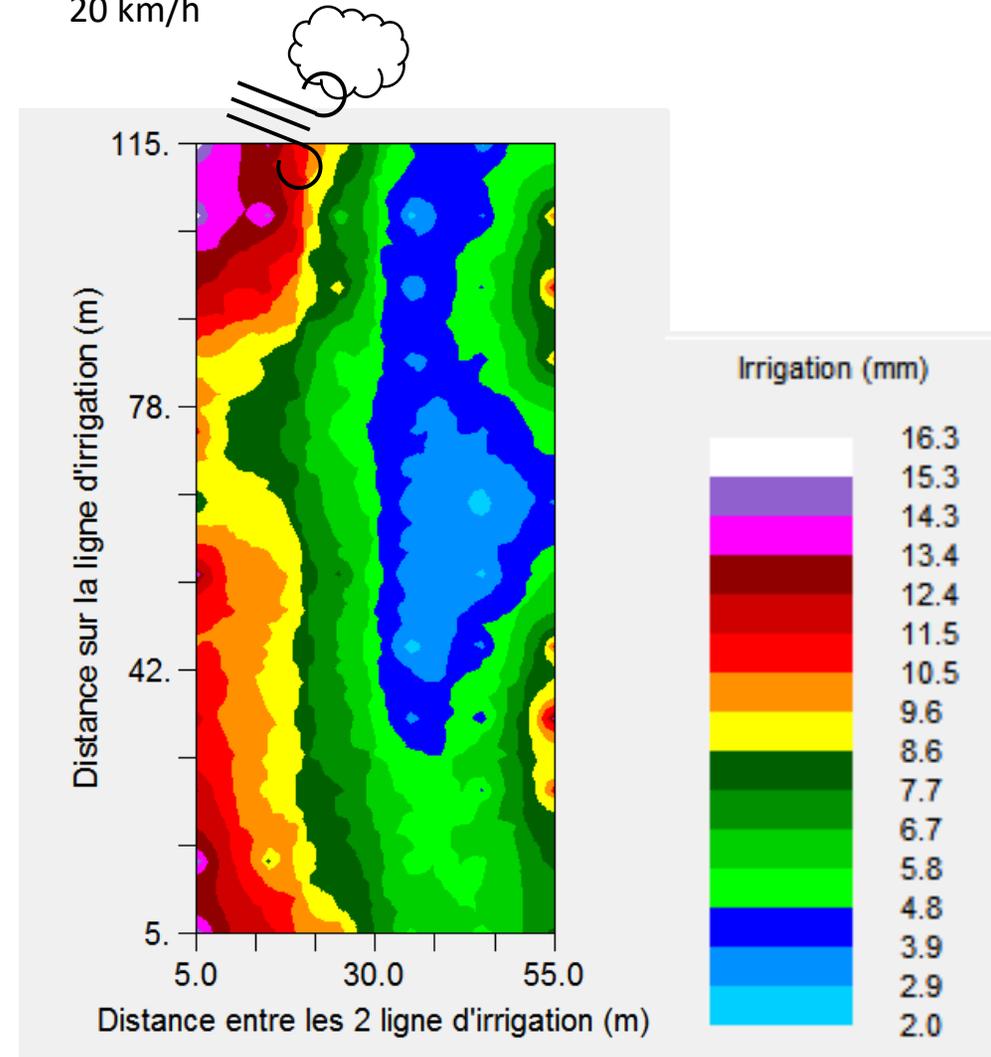




Patron d'uniformité des hauteurs d'eau mesurées

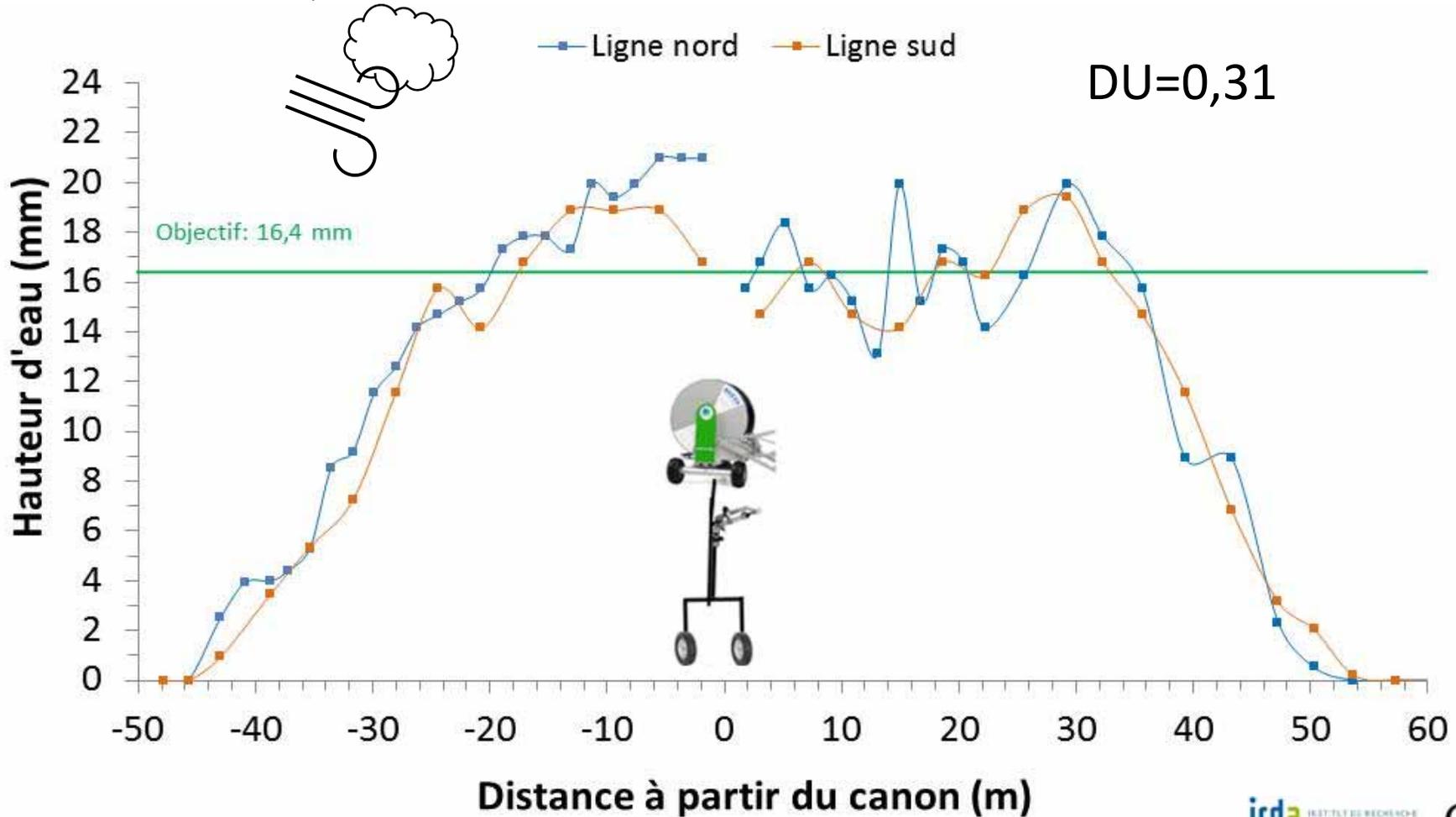
- Durée d'irrigation de 90 minutes
- Hauteur d'eau moyenne mesurée: 7,8 mm
- 78 m³/ha

Vent d'ouest à 9,3 km/h avec rafales à 20 km/h

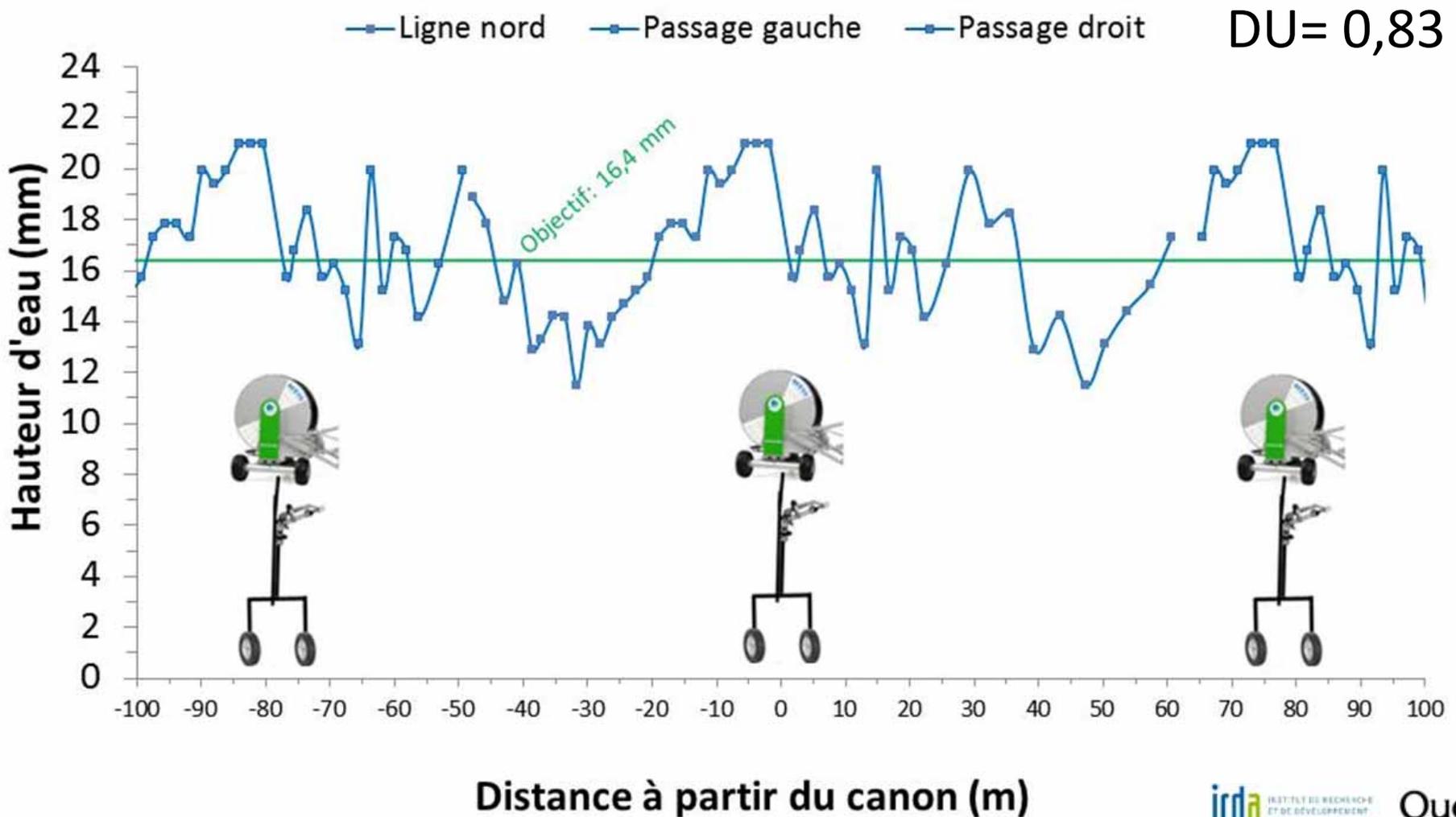


Exemple: Canon avec enrouleur

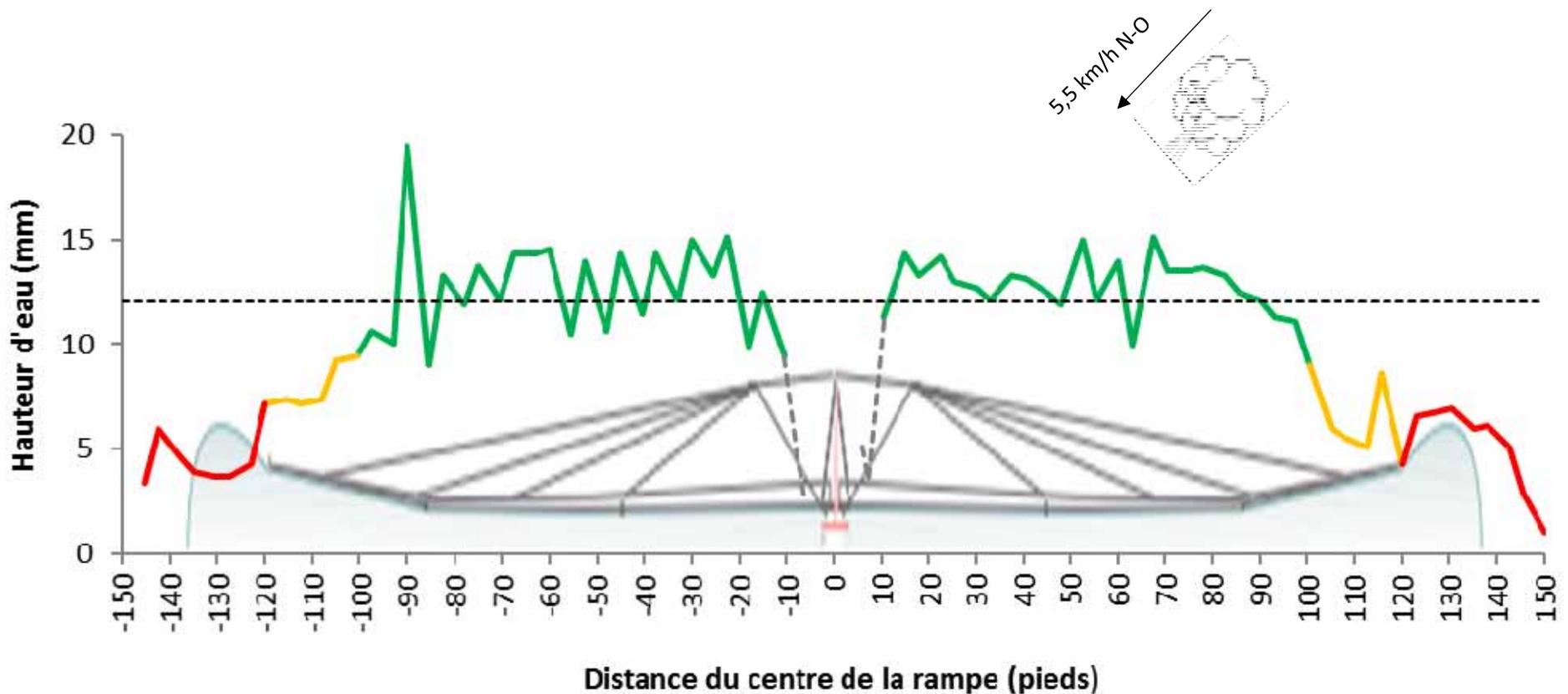
Vent d'ouest à 12,2 km/h
avec rafales à 41 km/h



Exemple: Canon avec enrouleur



Diagnostic de système – Rampe avec enrouleur

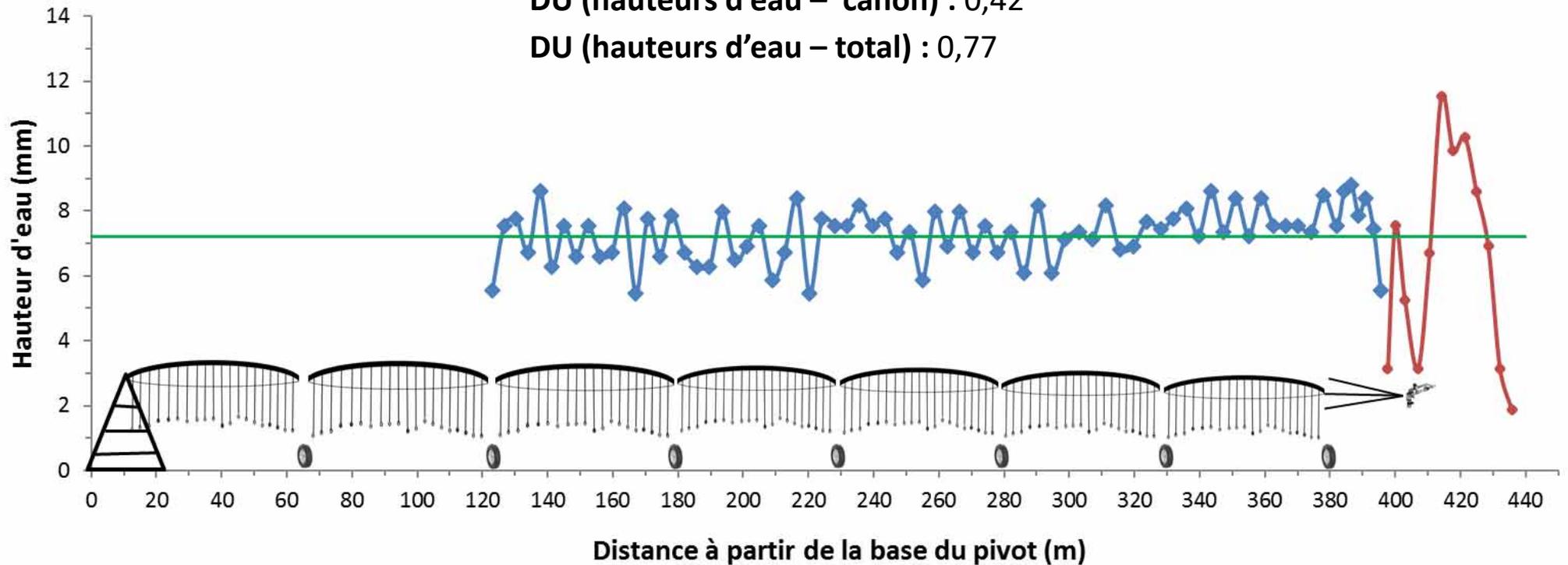


Exemple: Pivot basse pression

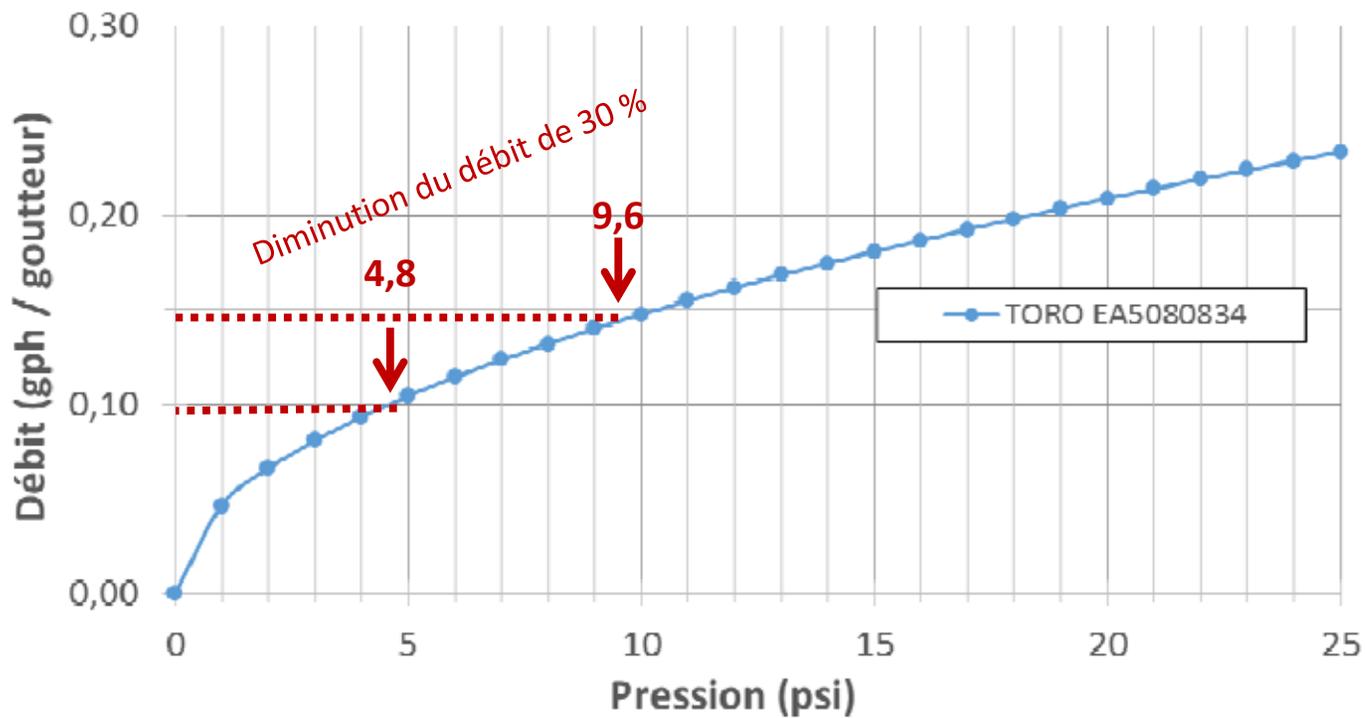
DU (hauteurs d'eau – pivot) : 0,85

DU (hauteurs d'eau – canon) : 0,42

DU (hauteurs d'eau – total) : 0,77

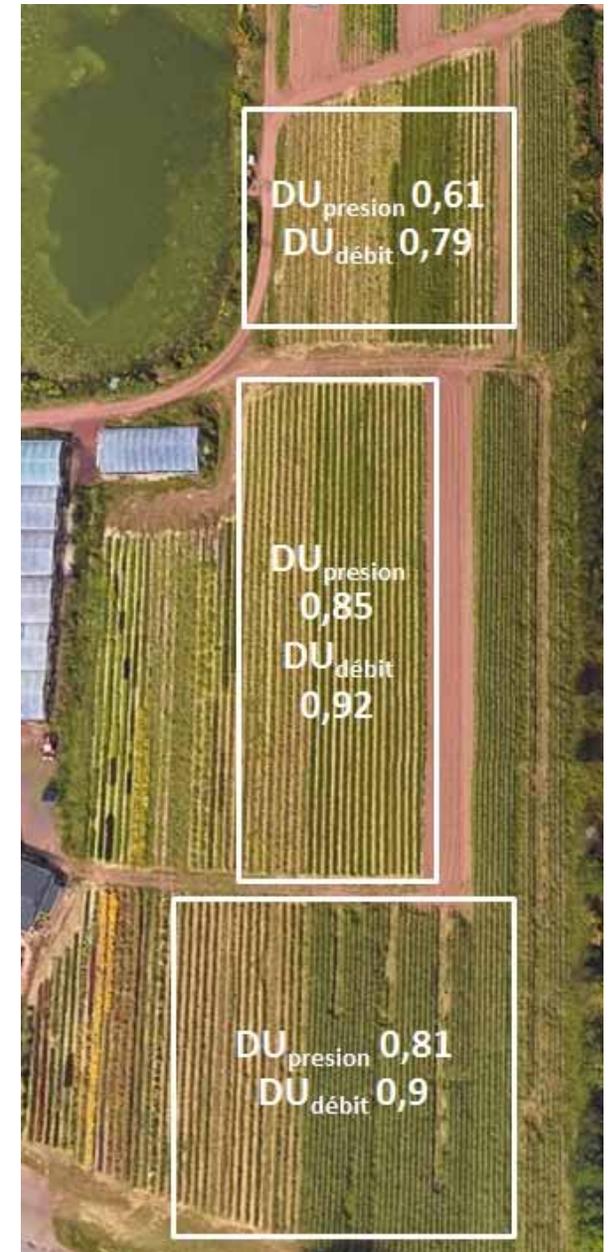


Diagnostic du système – Distribution spatiale des pressions



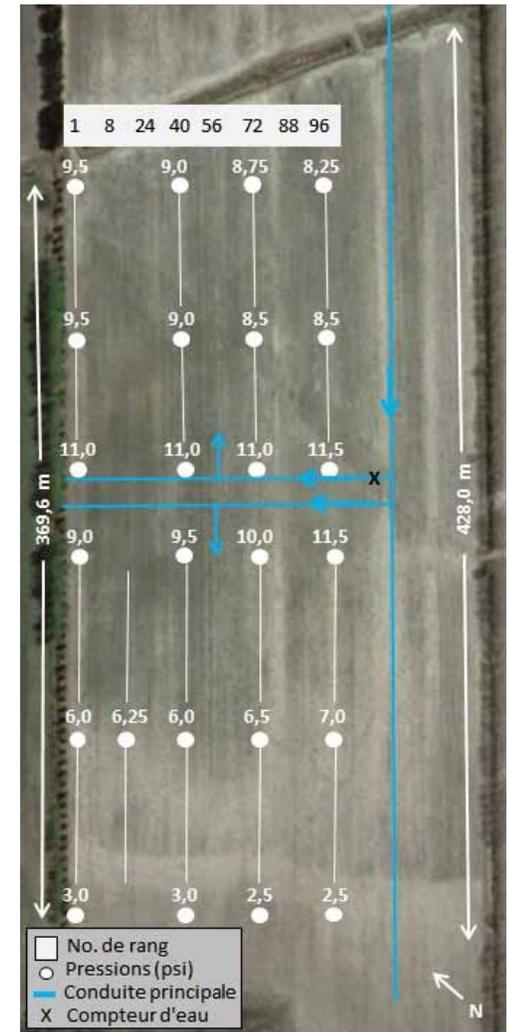
Diagnostic du système – Calculs des DU

- DU_{pression} pour l'ensemble du système = 0,67
- $DU_{\text{débit}}$ pour l'ensemble du système = 0,83



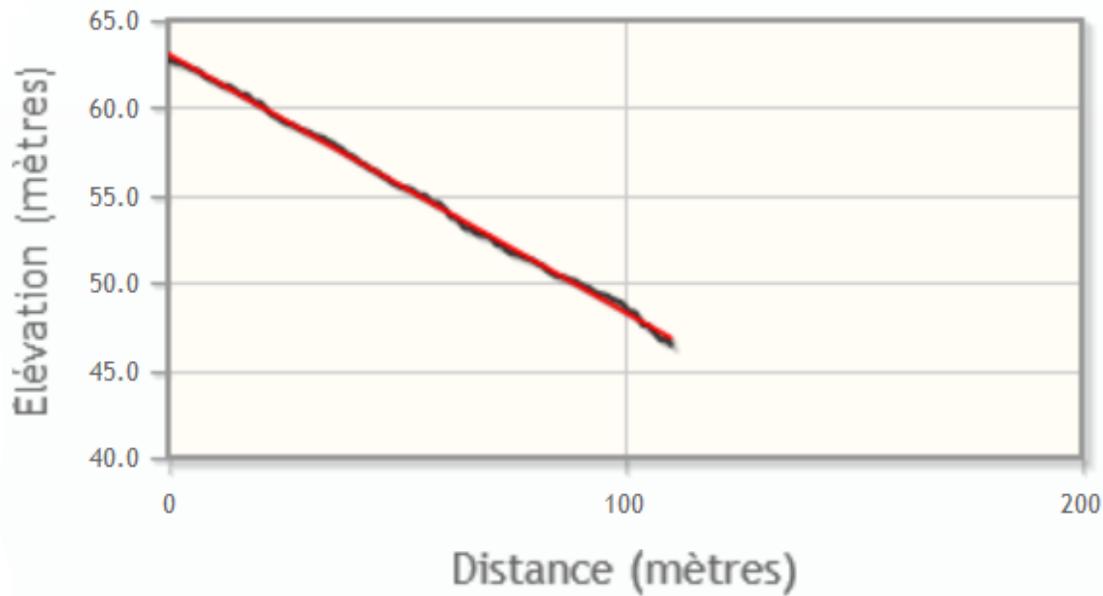
Diagnostic du système d'irrigation

- Plus de 370 m de long séparé en 2 sections
- Longueur limite pour 5/8"
- Fuites majeures sur le réseau
- Pression moyenne
 - 8,9 psi (Nord), 6,4 psi (Sud)
- DU(pressions)
 - 0,94 (Nord), 0,42(Sud), 0,51(moy)
- DU(débits)
 - 0,97 (Nord) 0,42(sud), 0,71(moy)



Pente et pression

Profil d'élévation



Pente (différence de dénivellation): -14.81%
Pente (régression linéaire simple): -14.74%



Tableau 3. Analyse sommaire pré-diagnostic – Système par goutte à goutte.

	Éléments d'analyse	Précisions	OK	Source potentielle de problèmes	Notes
A	Culture	()	Annuelle	Pérenne	1
B	Tubes gag en place		< 1 an	> 1 an	1
C	Conduites de tête sont-elles rigides?	(PVC, HDPE, etc. vs Lay flat)	Non	Oui	
D	Si C = Oui →	Présence de vanne d'aération?	Oui	Non	2
E	Pierrosité du sol		Faible	Élevée	3
F	Pente du champ		< 2 %	> 2 %	4
G		Uniforme ou Vallonné	Uniforme	Vallonné	5
H	Système gag	Plus d'un modèle dans le même champ?	Non	Oui	6
I		Fabricant ()			
J		Modèle ()			
K		Espace entre goutteur ()			
L	Design système conçu par professionnel		Oui	Non	7
M	Si L = Oui →	Modification au design initial?	Non	Oui	8
N	Pression d'opération		Connue (PSI)	Inconnue	9
O	Longueur tube gag (rang)	()	< 600'	> 600'	10
P	Nombre de tubes (champ)	()			
Q	Longueur tube gag totale (champ)	O x P ()			
R	Débit théorique (gpm/100') à PSI =N	()			
S	Débit total pour le champ	Q/100 x R ()			
T	Régulateur de pression		Oui	Non	11
U		Pression réglée à (PSI)	U = N	U ≠N	12
V	Débit min. et max. d'opération	Min. () Max. ()	U = S	U > ou < que S	13
W	Filtration (mesch ou micron)	()			
X		Min. recommandé fabricant ()	X = ou < W	X > W	14
Y	Conduites de tête avec pente vers système		Non	Oui	15
Z	Fertigation, emplacement injecteur		Avant le filtre	Après le filtre	16
AA	Engrais utilisés conviennent au gag?		Oui	Non	17
BB	Qualité de l'eau (physico-chimique)				18

Tableau 4. Information complémentaire ayant trait aux notes présentées au Tableau 3.

Notes	Informations complémentaires
1	Indication sur le potentiel de colmatage ou de fuites des tubes de gag si l'entretien du système a été négligé. La présence de plus d'une culture permet de se questionner sur la pertinence de recourir à une évaluation complète.
2	Les vannes d'aération permettent l'introduction d'air dans le réseau en condition de vacuum. Cela prévient le rétro siphonnage d'eau à travers les goutteurs enfouis lors du drainage des tubes de gag. Indication sur le potentiel de colmatage.
3	Il est recommandé d'opter pour un tube de gag aux parois plus épaisses en présence d'un sol avec une forte porosité.
4	Une forte pente favorise la variation de la pression dans le réseau de gag. Les effets peuvent être atténués à l'aide de goutteurs compensateurs pour la pression (PC). Il est recommandé d'opter pour un tube de gag aux parois plus épaisses en présence d'une pente très forte, car il y a un risque que la pression augmente à un niveau supérieur à celui auquel le tube peut résister.
5	La pression à l'intérieur du tube de gag peut augmenter dans les vallons et diminuer sur les buttons.
6	La présence de plus d'un modèle de gag permet de se questionner sur la pertinence de recourir à une évaluation complète.
7	Un design effectué par un spécialiste reconnu permet de se questionner sur la nécessité de recourir à une évaluation complète.
8	Un système initialement conçu par un spécialiste pour des conditions bien précises n'est pas garant de qualité si le système est utilisé dans d'autres conditions (ex : autre champ) ou si des modifications ont été apportées au système.
9	La pression d'opération doit être connue.
10	Généralement, la longueur maximale d'un tube de gag ne devrait pas excéder 600'. Au-delà de cette longueur, il est permis de se questionner sur la pertinence de recourir à une évaluation complète.
11	L'absence d'un régulateur de pression rend inutile l'évaluation de la performance du système d'irrigation. Situation à corriger avant de procéder au diagnostic.
12	La pression en amont du régulateur de pression doit être supérieure à la pression du régulateur. L'installation d'un manomètre en aval du régulateur permet de vérifier l'ajustement du régulateur.
13	Les régulateurs de pression sont conçus pour opérer de manière optimale à l'intérieur d'une certaine gamme de débits. Vérifier si le débit passant se situe dans l'intervalle du régulateur en place. Situation à corriger avant de procéder au diagnostic.
14	Risque de colmatage. Situation à corriger avant de procéder au diagnostic.
15	Lorsque la conduite de tête de champ est en pente, cela peut diriger l'eau de drainage des conduites principales vers les tubes de gag situés à son point le plus bas.
16	Des réactions de précipitation peuvent avoir lieu lors de l'injection de produits chimiques dans l'eau d'irrigation. L'injecteur doit donc être positionné avant le filtre afin que ces précipités soient captés par ce dernier.
17	Il est important de s'assurer que les engrais utilisés sont recommandés par le fabricant pour un usage avec un système par gag afin d'éviter les risques de colmatage
18	L'analyse physico-chimique de l'eau permet d'évaluer le risque de colmatage (CPVQ, 1992)

Tableau 5. Analyse sommaire pré-diagnostic – Système par canon avec enrouleur.

	Éléments d'analyse	Précisions	OK	Source potentielle de problèmes	Notes
A	Longueur du champ irrigué	()			
B	Largeur du champ irrigué	()			
C	Fabricant du canon	()			
D		Modèle ()			
E		Année de fabrication ()			
F		Canon acheté neuf? ()			1
G		Modifications depuis l'achat? ()			2
H	Longueur tuyau enrouleur	()			
I	Portée du canon	()			
J	Angle de couverture du canon	()			3
K	Source d'eau (étang, rivière, etc.)	()			4
L	Pression d'opération du canon		Connue (PSI)	Inconnue	5
M	Régulateur de pression		Oui	Non	6
N		Pression réglée à (PSI)			7
O	Débit min. et max. d'opération du régulateur	Min () Max ()			8
P	Type de filtration	()			
Q		Exigences du fabricant ()			
R	Champ irrigué en plusieurs passages?			Oui et non	
S	Si R = Oui →	Distance entre allées de passage ()			
T	Comment la vitesse d'avancement est définie?	()			

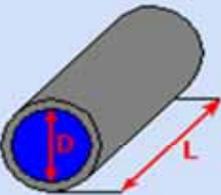
Tableau 7. Analyse sommaire pré-diagnostic – Système par rampe d’aspersion avec enrouleur.

Analyse sommaire pré-diagnostic – Système d’irrigation par rampe avec enrouleur					
	Éléments d’analyse	Précisions	OK	Source potentielle de problèmes	Notes
A	Longueur du champ irrigué	()			
B	Largeur du champ irrigué	()			
C	Fabricant de la rampe	()			
D		Modèle ()			
E		Année de fabrication ()			
F		Rampe achetée neuve? ()			1
G		Modifications depuis l’achat?			2
H	Longueur tuyau enrouleur	()			
I	Portée de la rampe	()			
J	Fertigation		Non	Oui	3
K	Pression d’opération de la rampe		Connue (PSI)	Inconnue	4
L	Source d’eau (étang, rivière, etc.)	()			5
M	Régulateur de pression		Oui	Non	6
N		À l’entrée de la rampe ()			
O		À chaque buse ()			
P		Pression réglée à (PSI)			7
Q	Débit min. et max. d’opération du régulateur	Min () Max ()			8
R	Type de filtration	()			
S		Exigences du fabricant ()			
T	Champ irrigué en plusieurs passages?			Oui et non	
U	Si T = Oui →	Distance entre allées de passage ()			
V	Comment la vitesse d’avancement est définie?	()			

Perte de charge dans les conduites

Element of pipe

Group: Subgroup:



Diameter of pipe D:

Length of pipe L:

Pipe roughness:

Flow medium

Flow medium:

Condition: liquid gaseous

Volume flow:

Weight density:

Dynamic Viscosity:

Additional data for gases:
Pressure (inlet, abs.):
Temperature (inlet):
Temperature (outlet):

Output of values: metrical US

Calculation output

Flow medium:	Water 20 °C / liquid
Volume flow::	300 l/min
Weight density:	998.206 kg/m³
Dynamic Viscosity:	1001.61 10-6 kg/ms
Element of pipe:	circular
Dimensions of element:	Diameter of pipe D: 2 in. Length of pipe L: 100 m
Velocity of flow:	8.09 ft./s
Reynolds number:	124893
Velocity of flow 2:	-
Reynolds number 2:	-
Flow:	turbulent
Absolute roughness:	0.002 mm
Pipe friction number:	0.02
Resistance coefficient:	34.29
Resist. coeff. branching pipe:	-
Press. drop branch. pipe:	-
Pressure drop:	2175.46 lbw./sq.ft. 15.11 psi

<http://www.pressure-drop.com/Online-Calculator/>

Présentation d'un feuillet destiné aux conseillers
« Évaluation globale de la situation de l'entreprise »

Exercice

Évaluation globale de la situation de l'entreprise

- Informations sur l'entreprise Ferme du 1^{er} rang
- Première rencontre avec le producteur le 17 janvier 2018
- Trois blocs de terrain (voir plan)
- L'exercice porte sur le bloc 1^{er} rang (A)

Rivière Bleue

Étang 308' x 158' x 8'
(pente 1:1)

Bloc 1
1er rang
(A)

Pluviomètre

← 10 km →



Station Agrométéo

Bloc 2

Bloc 3

20 ha pommes de terre – 100 % irrigués
par aspersion (canon enrouleur)

- deux champs:
 - Pdt (12 ha)
 - Pdt (8 ha)

5 ha fraises à jours neutres – 100 %
irrigués par goutte à goutte (pente 1 %)

- deux champs:
 - Fraise (2 ha)
 - Fraise (3 ha)

Informations additionnelles

- Évolution des superficies irriguées 1^{er}rang (A) contre le stress hydrique seulement
 - Pomme de terre: 0 ha en 2019 et 20 ha en 2020
 - Fraise: 5 ha en 2019 et 5 ha en 2020
- L'étang est rempli par la fonte des neiges et est donc plein au printemps. Il n'y a pas de recharge naturelle mais il sera rempli une fois en cours de saison à partir de la rivière, à l'aide d'une pompe.
- Des analyses physico-chimiques et microbiologiques de l'eau de l'étang ont été effectuées en 2017 et n'ont démontré aucun problème. L'eau de la rivière n'a pas été analysée.
- Le canon enrouleur qui sert à irriguer les pommes de terre a une capacité de 4 ha/jour.
- Un diagnostic des systèmes d'irrigation (canon et goutte à goutte) ont été effectués en 2017. Correctifs encore à corriger : pas de manomètre sur canon et les tubulures goutte à goutte sont d'une longueur de 800'.
- Le sol en pommes de terre est un sable (série Morin) et en fraises est un loam sableux (série Batisca).
- Il y a un pluviomètre sur la ferme et il est situé à 1 km du champ le plus éloigné.
- Les outils de gestion de l'irrigation sont le tensiomètre dans les champs Pdt (12 ha) et Fraise (3 ha). Le champ Pdt (8 ha) est régi à l'aide du bilan hydrique.
- Pour la pomme de terre, il y a en moyenne 3 irrigations par année avec une dose de 25 mm chacune. Concernant la fraise, les durées d'irrigation sont de 120 min (équivalent de 3,5 mm) et le nombre est inconnu.

1. Analyse relative à l'irrigation - Ressource en eau

Évaluateur			
Entreprise		Bloc de terrain	
Date de l'évaluation		Pour l'année	

1.1 Approvisionnement en eau - Volume

Culture(s) irriguée(s)	Superficie (ha)	Superficie irriguée (ha)	Prévision des superficies irriguées dans le futur	
			Année suivante	Moyen terme

SOURCES D'EAU ET VOLUME (1 m³ = 35,31 pi³)

Étang(s)	Dimensions	Volume d'eau disponible (m ³) + taux recharge
Rivière(s)	s.o.	
Puits	s.o.	
Réseau municipal	s.o.	
Total		0

Culture(s)	Besoin en eau selon culture (m ³ /ha)*	Superficie (ha)	Besoin total (m ³)	Déficit (m ³)
Total			0	0

1.2 Approvisionnement en eau - qualité

SOURCES D'EAU	Analyse physico-chimique de l'eau effectuée		Analyse microbiologique de l'eau effectuée	
	Oui/non	Problématique	Oui/non	Problématique
Étang(s)				
Rivière(s)				
Puits				
Réseau municipal				

1.3 Commentaires et recommandations relatifs à l'approvisionnement - volume et qualité

*selon références

2. Analyse relative à l'irrigation - systèmes						
Évaluateur						
Entreprise		Bloc de terrain				
Date de l'évaluation		Pour l'année				
2.1 Types de système						
				Objectifs de l'irrigation		
Aspersion (culture et système)	Système déplacé en cours de saison (Oui/non)	Capacité du système (ha/jour)	Suffisant pour une couverture adéquate	Contre le gel	Contre le stress hydrique	Autre
Goutte à goutte (culture)	Superficie (ha)			Type de tubulure		
2.2 Diagnostic des systèmes						
Aspersion (no. champ ou système)	Effectué (O/N)	Année du diagnostic	Élément(s) non corrigé(s) suite au diagnostic			
Goutte à goutte (no. champ)						
2,3 Commentaires et recommandations relatifs aux systèmes d'irrigation						

3. Analyse relative à l'irrigation - Gestion

Évaluateur			
Entreprise		Bloc de terrain	
Date de l'évaluation		Pour l'année	

3.1 Caractéristiques du sol

No. champ	Culture	Cultivar	Type de sol	% > 2 mm	Série de sol	Estimation de réserve en eau du sol (mm/30 cm)*

3.2 Gestion de l'irrigation

Station météo sur la ferme ?		À l'extérieur de la ferme (distance approximative km)					
Pluviomètre		Si oui, combien :			Distance (m) entre le pluviomètre et le champ le plus éloigné		
Technique(s) d'irrigation	Outil(s) de gestion utilisé(s)					Quantité d'eau appliquée par irrigation (mm)	Nombre d'irrigation(s) par année
Aspersion (no. champ)	Bilan hydrique	Tensiomètre	Sonde TDR	Autre	Aucun		
Goutte à goutte (no. champ)						Durée moyenne des irrigations (min)	
Est-ce que les quantités mentionnées à 3,2 sont plausibles avec la section 1,1? (Oui/non)							

3.3 Commentaires et recommandations relatifs à la gestion de l'irrigation

*Selon références, mesurée, etc.

4. Analyse relative à l'irrigation - Suivi en saison

Évaluateur				Est-ce qu'un diagnostic du système a été fait en cours de saison? (oui/non)
Entreprise		Bloc de terrain		
Date de l'évaluation				Date

4.1 Caractéristiques de la culture

No. champ	Culture	Profondeur d'enracinement	Présence ou absence de compaction	État du drainage	État général de la culture	Commentaires

4.2 Gestion de l'irrigation

Technique(s) d'irrigation	Quantités appliquées par épisode	Commentaires sur les quantités appliquées par épisodes	Moment des irrigations (jour, nuit, etc.)	Commentaires sur le moment des irrigations
Aspersion				
Goutte à goutte				
Utilisation des outils	Installation adéquate? (profondeur, contact avec sol, etc.) Commentaires		Consigne d'irrigation (Oui/non) Valeur consigne	Commentaires
Tensiomètre				
Sonde TDR				
Autre				

4.3 Commentaires et recommandations relatifs au suivi en saison

Coordonnées des formateurs

Carl Boivin, IRDA

2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
418 643-2380 poste 430
carl.boivin@irda.qc.ca

Jérémie Vallée, IRDA

2700, rue Einstein
Québec, Québec G1P 3W8
Tél.: 418 643-2380 poste 432
jeremie.vallee@irda.qc.ca

Paul Deschênes, IRDA

335, rang des Vingt-Cinq Est
Saint-Bruno-de-Montarville, (Québec) J3V 0G7
450 653-7368 poste 381
paul.deschênes@irda.qc.ca

Caroline Côté, IRDA

335 rang des Vingt-Cinq Est
Saint-Bruno-de-Montarville, (Québec) J3V 0G7
450 653-7368 poste 310
caroline.côté@irda.qc.ca

Daniel Bergeron, DRCN du MAPAQ

Centre de services agricoles de Québec
1685, boulevard Hamel Ouest, bureau RC-22
Québec (Québec) G1N 3Y7
418 643-0033 poste 1707
daniel.bergeron@mapaq.gouv.qc.ca

Sources

- Bergeron, D. 2010. Régie de l'irrigation goutte à goutte dans la production de fraises à jours neutres au Québec, Mémoire de maîtrise, Université Laval, 58 p.
- Bergeron, D. et S. Bouchard. 2015. Irriguer : Combien ça coûte? conférence présentée lors du colloque Nos pommes de terre ont soif de savoir, 17 février 2015, Trois-Rivières, Québec.
- Boivin, C., J. Vallée, D. Bergeron et P. Deschênes. 2017. Outils d'aide à la décision en gestion de l'irrigation: l'assise d'un réseau d'appui pour les producteurs de pommes de terre, IRDA, Rapport final, 11 p.
- Boivin, C., J. Vallée, P. Deschênes, M. Guillou et D. Bergeron. 2016. Caractérisation de l'usage de l'eau en irrigation. Rapport final, IRDA, 229 p. incluant des annexes.
- Bonin, S. 2009. Régie agroenvironnementale de l'irrigation dans la production de canneberges (*Vaccinium macrocarpon ait.*), Mémoire de maîtrise, Université Laval, 114 p.
- CRAAQ. 2006. L'implantation d'un verger de pommiers, 168 p.
- Dugdale, H., G. Harris, J. Neilsoen, D. Richards, G. Roth et D. Williams, 2012. WATERpak – a guide for irrigation management in cotton and grain farming systems, Third Edition, Australian Government, Cotton research and Development Corporation, 495 p. [En ligne] <https://www.cottoninfo.com.au/sites/default/files/documents/WATERpak.pdf>
- Létourneau, G., J. Caron, L. Anderson et J. Cormier. 2015. Matric potential-based irrigation management of field-grown strawberry: Effects on yield and water use efficiency, Agricultural water management, Vol. 161, pp.102-113, <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.005>
- [Nadon, S., D. Bergeron, C. Boivin, J. Vallée. 2016. Création et validation d'un feuillet technique sur la performance de systèmes d'irrigation pas aspersion et par goutte à goutte en champ. Rapport de recherche présenté au RLIO. IRDA : 59 p.](#)
- North Dakota State University (NDSU), 2017. Soil, Water and Plant Characteristics Important to Irrigation (AE1675 Revised), 16 p. [En ligne] <https://www.ag.ndsu.edu/publications/crops/soil-water-and-plant-characteristics-important-to-irrigation/ae1675.pdf>
- OMAFRA, 1990. Programme d'irrigation des tomates - Méthode du bilan hydrique, Agdex 257/560 [En ligne] <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/90-113.htm>
- Shock, C.C, F.X. Wang, R. Flock, E. Feibert, C.A. Shock et A. Pereira. 2013. Irrigation monitoring using soil water tension, Oregon State University, Extension Service, EM 8900, 9 p.
- Stetson, L.E. et B.Q. Mecham. 2011. Irrigation, 6th Edition, Irrigation Association, Falls Church, VA, 1089 p.
- Van der Gulik, T.W., 2010. Landscape Drip Irrigation Scheduling Calculator Users Guide, Irrigation Industry Association of British Columbia (IIABC), 26 p.
- Vallée, J., C. Boivin et D. Bergeron. 2017. Irrigation goutte à goutte de la pomme de terre, Rapport final, IRDA, 25 p.