



MANUEL DE PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION POUR LES PRAIRIES



Agriculture and
Agri-Food Canada

Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Canada

Guide de programmation de l'irrigation pour les Prairies

Image de la page couverture :

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire (2024)

Une version électronique est disponible à www.publications.gc.ca

Version PDF :

No de catalogue : A59-94/2024F-PDF

ISBN : 978-0-660-72359-4

No AAC : 13232F

La présente publication peut être citée ainsi :

Derdall E., Svendsen E., Appels W., Timmerman M., Drury C., Ingell S., 2024. Guide de programmation de l'irrigation pour les Prairies. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Saskatoon (Saskatchewan) Canada.

Guide de programmation de l'irrigation pour les Prairies.

Pour plus de renseignements, visitez le site www.agriculture.canada.ca ou composez le numéro sans frais 1-855-773-0241.

REMERCIEMENTS

Le financement du présent guide a été assuré par Agriculture et Agroalimentaire Canada et le Saskatchewan Agriculture Development Fund. La réalisation du présent guide n'aurait pu être possible sans la contribution des membres de notre équipe de rédaction du guide de programmation de l'irrigation pour les Prairies : Joel Peru (Agence de la sécurité de l'approvisionnement en eau), Jeff Ewen (irrigant), Brian Wilson (gouv. du Manitoba), Morgan Cote (gouv. de la Saskatchewan), Shelley Woods (gouv. de l'Alberta), Len Hingley (gouv. de l'Alberta), Scott Graham (Simplot), Rebecca Shortt (gouv. de l'Ontario), Patrick Handyside (AAC), Sonja Fransen (AAC), Erin Karppinen (AAC).

AVANT-PROPOS

L'eau douce est une ressource publique partagée entre de nombreux utilisateurs concurrents, dont les agriculteurs. Face à la concurrence croissante des autres secteurs pour l'eau et aux menaces de sécheresses et de pénuries d'eau dans le futur, il est important que les agriculteurs soient de bons gestionnaires et exploitent au mieux la part de cette ressource qui leur est allouée.

L'une des premières mesures, et la plus économique, pour optimiser l'utilisation de l'eau, est d'établir un programme d'irrigation pratique. La clé d'une stratégie d'irrigation réussie consiste à déterminer parmi les méthodes et les outils disponibles, ceux qui conviennent le mieux à chaque exploitation agricole, tant sur le plan des coûts que de la commodité, afin que leurs applications soient fructueuses à long terme.

Le présent guide propose aux agriculteurs des outils à l'aide desquels ils pourront élaborer et intégrer des pratiques de programmation d'irrigation dans leurs activités quotidiennes. Il aborde des sujets comme les interactions entre le sol, l'eau et les cultures, les méthodes de programmation, les technologies existantes disponibles et l'irrigation de précision, de manière à fournir aux irrigants les connaissances et les outils nécessaires à la mise en œuvre de pratiques de programmation d'irrigation, tant pour les systèmes d'irrigation simples que complexes.

Le présent guide s'appuie sur les versions antérieures des guides d'irrigation de la Saskatchewan et de l'Alberta, en conservant les informations publiées précédemment tout en y apportant des mises à jour importantes en raison des progrès accomplis dans les technologies de programmation et de la disponibilité commerciale de l'irrigation de précision.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION 2

PROGRAMMER L'IRRIGATION : BESOIN DE SAVOIR 4

- La relation entre l'eau et le rendement 5
- Interactions existantes entre le sol, la culture et l'eau 6
- Cartographie de vos sols 8
 - Classification des sols pour l'irrigation* 11
 - Considérations relatives à la qualité de l'eau* 12
- Caractéristiques des sols et de l'eau 14
- Besoins hydriques des cultures 16
- Systèmes d'irrigation et impacts sur les programmes d'irrigationS 18
- Différences régionales 20

MISE EN CONTEXTE : PROGRAMMES D'IRRIGATION 23

- Utilisation de capteurs pour mesurer ou estimer les besoins hydriques des cultures 24
 - Types de capteurs* 25
- Programmation de l'irrigation basée sur le sol 26
 - Méthode gravimétrique de mesure de l'humidité du sol* 26
 - Méthode d'évaluation de l'humidité du sol au toucher* 27
 - Tensiomètre* 29
 - Pédohygromètres : blocs de gypse et blocs à matrice granulaire* 32
 - Réfectométrie temporelle (TDR)* 33
 - Sonde capacitive* 35
 - Radiomètre à hyperfréquences* 37
 - Sonde à neutrons* 38
- Programmation de l'irrigation basée sur la météo 40
 - Bilan hydrique* 40
 - Évapotranspiration* 40
- Programmation de l'irrigation basées sur les plantes 42
 - Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)* 42
 - Température du couvert végétal / indice de stress hydrique de la culture (CWSI)* 46
- Cultures spécialisées 48
 - Luzerne* 48
 - Pomme de terre* 49

PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION GOUTTE-À-GOUTTE ET DE LA MICRO-IRRIGATION 53

- Composants du système d'irrigation goutte à goutte 53

Programmation de l'irrigation pour les systèmes d'irrigation goutte à goutte	55
IRRIGATION À DÉBIT VARIABLE : APPLICATIONS DE L'AGRICULTURE DE PRÉCISION À L'IRRIGATION	57
Incidences	57
Zones statiques d'IDV	60
<i>Cartographie des zones</i>	
<i>Gestion des zones</i>	
<i>Évaluation des zones</i>	
Zones dynamiques d'IDV	63
<i>Cartographie des zones</i>	
<i>Gestion des zones</i>	
<i>Évaluation des zones</i>	
QUAND FAUT-IL ARRÊTER D'IRRIGUER?	68
AIDE OFFERTE POUR LA PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION	69
FIGURES ET TABLEAUX DE RÉFÉRENCES	70
ANNEXE B : COURBES DE CONSOMMATION QUOTIDIENNE D'EAU DES CULTURES POUR LES PROVINCES DES PRAIRIES)	76
ANNEXE C : ÉQUATIONS	79
ANNEXE D : EXEMPLE DE CALCULS POUR LA PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION	82

INTRODUCTION

Dans les Prairies, l'eau est le deuxième facteur le plus limitatif de la productivité des cultures, après la température. De plus, pour maximiser la productivité des cultures, l'eau doit être disponible au bon moment et en quantité suffisante pour combler leurs besoins hydriques. La nature est rarement aussi accommodante, surtout dans les Prairies où jusqu'à la moitié des précipitations tombent en hiver. Une partie de ces précipitations soutient la croissance printanière, mais pendant la saison de croissance, les précipitations peuvent être sporadiques, et suffisamment légères pour s'évaporer avant d'atteindre les cultures, ou si intenses en une courte période pour provoquer des inondations, ou encore si localisées pour que des champs distants d'à peine quelques kilomètres aient des régimes de précipitations très différents. En outre, les données climatiques historiques de l'Ouest du Canada indiquent que cette région connaît pendant ses saisons de végétation des cycles de périodes prolongées de temps chaud et frais et de périodes prolongées de forte humidité et de sécheresse. Lorsqu'un été chaud coïncide avec des

L'irrigation :
consiste à apporter de l'eau à une culture pour combler ses besoins qui ne sont non comblés par la réserve en eau du sol et par les précipitations.

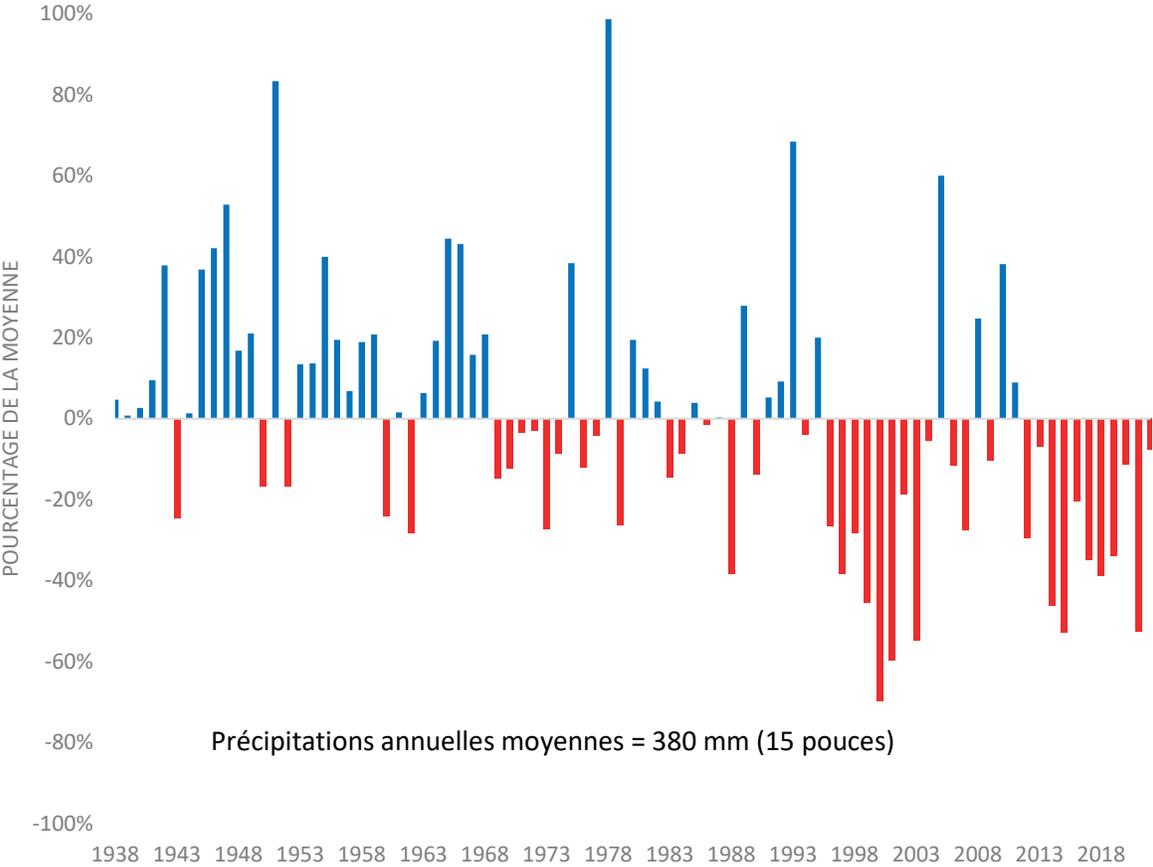


Figure 1. Écart par rapport aux précipitations annuelles moyennes (380,0 mm =15,0 pouces) à Lethbridge (Alb.) (1938 – 2022) (Les barres bleues au-dessus de zéro indiquent les années où les précipitations ont été supérieures à la moyenne; les barres rouges sous zéro, les années où les précipitations ont été inférieures à la moyenne) (ECCC).

précipitations inférieures à la moyenne, les productions agricoles éprouvent encore plus de difficultés (Figures 1, 2).

Un apport d'eau par irrigation, lorsqu'il est fait au bon moment et à la bonne quantité, peut contribuer à maximiser le rendement et la qualité des récoltes, tout en offrant une protection contre la variabilité saisonnière de l'alimentation hydrique. L'irrigation permet également de cultiver des plantes dont la valeur est plus élevée.

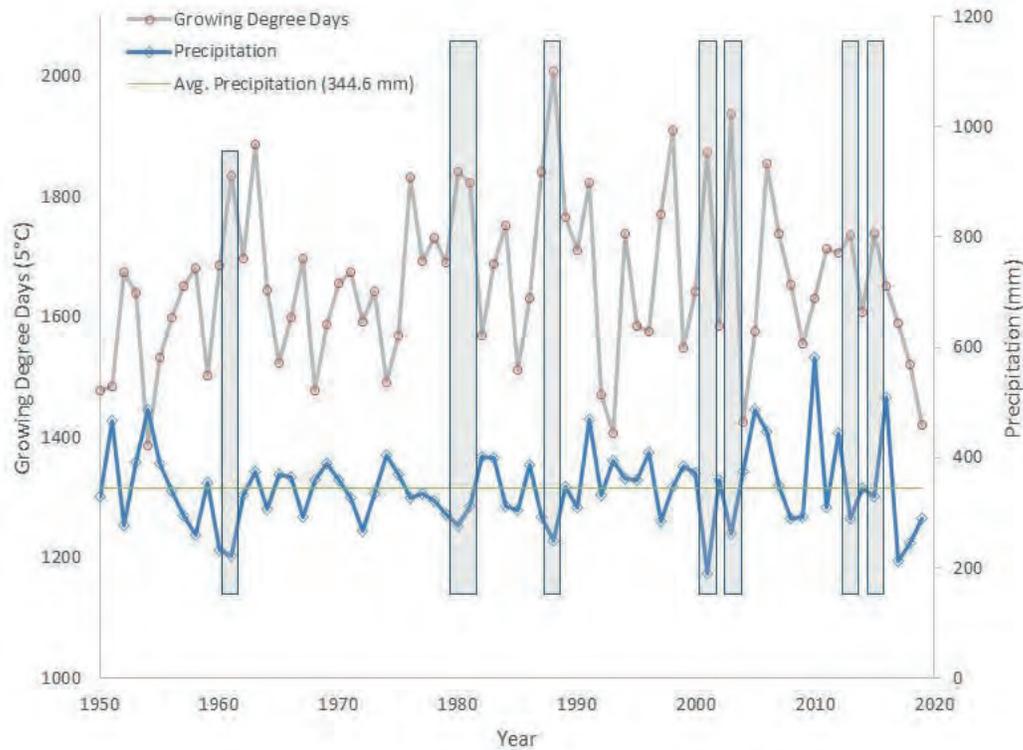


Figure 2. Degrés-jours de croissance annuels (base 5 °C) et précipitations à Rosetown, en Saskatchewan (1950-2019). Les barres grises indiquent les années où des conditions de croissance relativement chaudes ont coïncidé avec des précipitations annuelles inférieures à la moyenne (RNCAN, ECCC).

Au Canada, l'irrigation de plus d'un million d'hectares (2,5 millions d'acres) de terres agricoles compte pour 80 % de la consommation nationale d'eau douce. Une infime quantité d'eau d'irrigation retourne dans les réserves d'eau douce (lacs, réservoirs, rivières). Et bien que l'eau douce soit souvent considérée comme une ressource abondante au Canada (7 % des réserves mondiales d'eau douce renouvelable coulent dans les rivières canadiennes), la contrainte critique est d'ordre géographique : 60 % de l'eau douce au Canada s'écoule vers le nord, bien loin d'où sont situées la majorité de la population (85 %), de l'industrie et de l'agriculture (c'est-à-dire à moins de 300 km de la frontière canado-américaine). Par conséquent, l'utilisation des ressources en eau douce canadiennes doit être gérée avec soin pour assurer un approvisionnement durable en eau de qualité tout en comblant les besoins des divers écosystèmes (p. ex. habitats fauniques aquatiques et terrestres) et en respectant les ententes en matière de gestion des eaux transfrontalières (interprovinciales et internationales).

PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION : BESOIN DE SAVOIR

Un système d'irrigation implique des coûts d'investissement (tuyauterie, pompes, système de gicleurs et d'opérations (électricité, entretien, réparation, main-d'œuvre, administration) considérables. Pour tirer le meilleur parti de votre investissement, vous devrez maximiser l'efficacité de votre système (p. ex., réduire la consommation d'eau et d'énergie sans sacrifier le rendement ou la qualité des récoltes). Vous pouvez y parvenir en programmant vos irrigations.

Une bonne programmation de l'irrigation prévient le stress hydrique des cultures. En clair, cela signifie que l'eau doit être appliquée (1) avant que la culture en manque (**BON MOMENT**), (2) uniquement aux endroits qui en ont besoin (**BON ENDROIT**) (3) seulement à la quantité nécessaire pour amener l'humidité du sol à la capacité au champ (**BONNE QUANTITÉ**). Cette approche peut améliorer la rentabilité, car elle permet :

- d'accroître le rendement, la qualité et l'uniformité de la culture
- Réduction des pertes d'éléments nutritifs par réduction du lessivage
- de faire une utilisation plus efficace de l'eau (réduction de l'apport inutile d'eau)
- d'abaisser les coûts d'opération (moins de pompage inutile)

La variabilité inhérente au champ et au paysage au niveau des propriétés et de la fertilité du sol peut compliquer la programmation. Ces facteurs interagissent avec les conditions météorologiques et se traduisent par différents stades phénologiques de la culture et besoins hydriques à l'intérieur d'un même champ.

Quatre éléments d'information importants sont nécessaires pour programmer efficacement l'irrigation :

- la capacité de rétention d'eau du sol;
- l'état hydrique du sol;
- un ou des indicateurs de stress hydrique des plantes;
- la consommation d'eau spécifique à la culture et au stade phénologique de la culture.

En général, les précipitations sont un cinquième facteur qui est pris en compte que ce soit par la mesure de l'humidité du sol, par l'utilisation d'un pluviomètre ou d'une station météorologique locale ou par l'utilisation de données régionales collectées par un réseau gouvernemental ou privé. Les systèmes de programmation utilisant des modèles complexes intègrent les précipitations pour estimer l'humidité du sol.

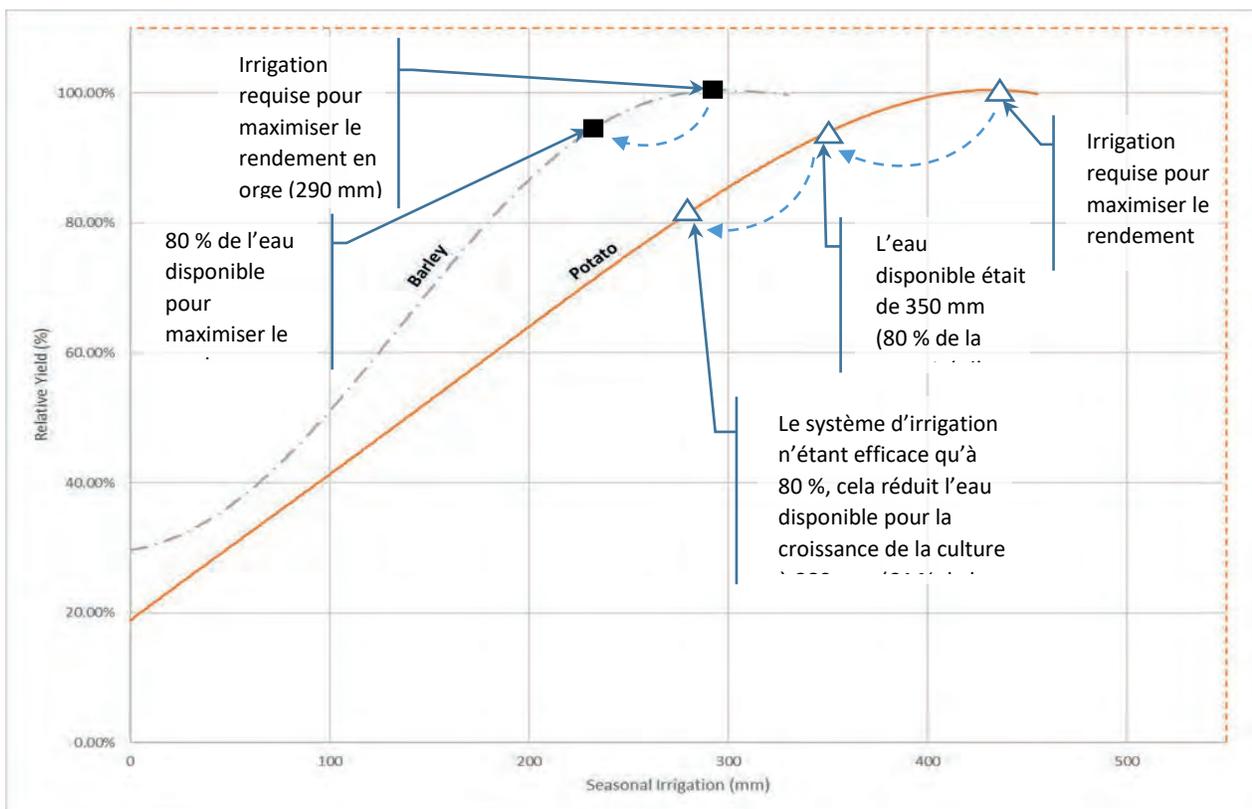
Le programme d'irrigation le plus simple consiste à irriguer l'ensemble du champ en fonction de la zone du champ qui a le plus grand besoin hydrique. Avec cette approche, pratiquement aucune partie de la culture ne souffrira de stress hydrique, mais des zones du champ risqueront d'être trop irriguées. On peut déterminer le besoin hydrique d'une culture par l'observation de signes visuels (p. ex., flétrissement, faible vigueur des plantes) ou en vérifiant l'humidité de la zone racinaire avec une bêche. À l'autre extrémité des méthodes d'irrigation possibles, des systèmes sophistiqués peuvent employer une série de capteurs d'humidité du sol, l'imagerie par télédétection aérienne (p. ex., satellite, drones) et des zones de gestion de l'irrigation contrôlables (c'est-à-dire qu'on irrigue seulement les zones d'un champ où la culture a besoin d'eau). Cette approche exige une plus grande gestion, mais lorsqu'elle est appliquée correctement, toutes les plantes reçoivent la bonne quantité d'eau, ce qui permet d'optimiser

le rendement, la qualité et l'uniformité, en plus de réduire les coûts énergétiques (pompage) et la consommation d'eau.

La relation entre l'eau et le rendement

L'une des principales raisons de programmer l'irrigation selon les besoins des cultures est d'optimiser le rendement en fonction de l'eau d'irrigation disponible (p. ex., lorsqu'on ne dispose pas de toute l'eau nécessaire pour maximiser le rendement). Cette notion est généralement définie par des termes tels que *l'efficience d'utilisation de l'eau* ou *productivité de l'eau*. En agronomie, ces deux termes sont souvent utilisés indifféremment. Dans le passé, les ingénieurs utilisaient le terme *efficacités d'utilisation de l'eau* pour décrire l'efficacité du système global (canalisation, irrigation, gestion, culture), tandis que les agronomes utilisaient le terme *productivité de l'eau* pour définir l'efficacité du système cultural. Quoi qu'il en soit, les deux termes font référence à la quantité d'eau nécessaire pour produire une unité de culture. En tant qu'irrigant, vous vous efforcez de maximiser la productivité et la rentabilité.

Lorsqu'une culture subit un stress (carence, pression exercée par des ravageurs, chaleur intense, sécheresse), l'impact final est un rendement réduit (en biomasse, en grain, en fruits). Dans le cas du stress hydrique, les plantes peuvent souffrir d'une humidité excessive (inondation) ou d'un manque d'eau (sécheresse). Les courbes eau-rendement montrent comment le rendement des cultures est modifié par la disponibilité saisonnière de l'eau. Ces courbes ne tiennent pas compte du moment des arrosages, mais montrent l'impact d'un manque ou d'un excès d'eau (total saisonnier) sur le rendement d'une culture (Figure 3; Exemples 1, 2 de l'annexe D, page 82).



Les courbes eau-rendement illustrent les relations qui existent pour un système idéal où le rendement réduit n'est attribuable qu'à un apport d'eau insuffisant pour combler les besoins de la culture (= stress hydrique de la culture). En pratique, toute l'eau apportée par irrigation n'atteint pas la culture, car il y a des pertes d'eau dues à des inefficacités au chapitre de la conception, des composants ou de la gestion du système (p. ex., évaporation d'eau d'irrigation par aspersion, dérive, ruissellement, drainage en profondeur, stress de la culture). Ces inefficacités, ainsi qu'une mauvaise programmation, peuvent avoir

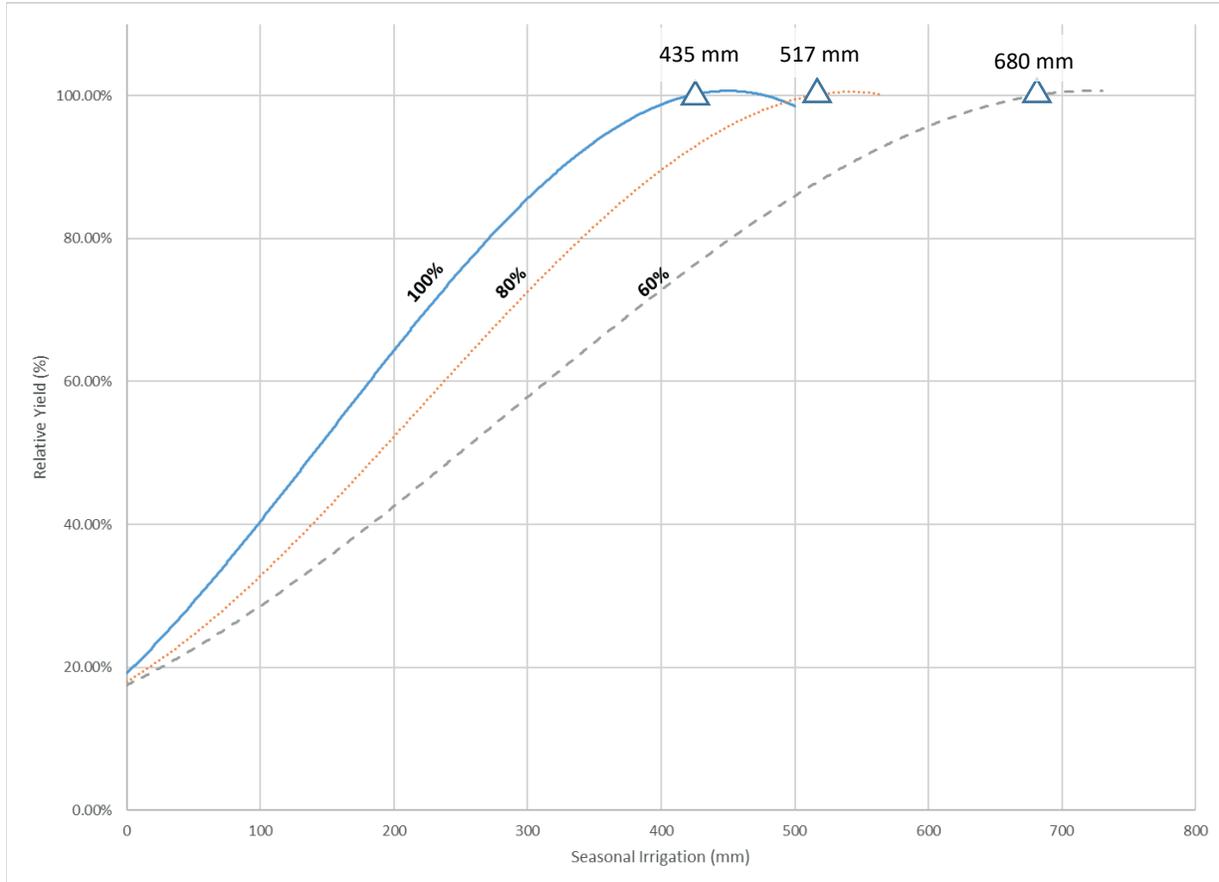


Figure 4. Courbes eau-rendement de cultures de pomme de terre sous irrigation modélisées pour différentes efficacités de système d'irrigation (Les sorties du modèle sont basées sur les données météorologiques d'Outlook en Sask. de 2018.) L'analyse a été effectuée au moyen du programme

un effet cumulatif sur le rendement de la culture. Pour obtenir le rendement souhaité, il faut prendre en compte les inefficacités du système d'irrigation et apporter une quantité d'eau supplémentaire (Figure 4).

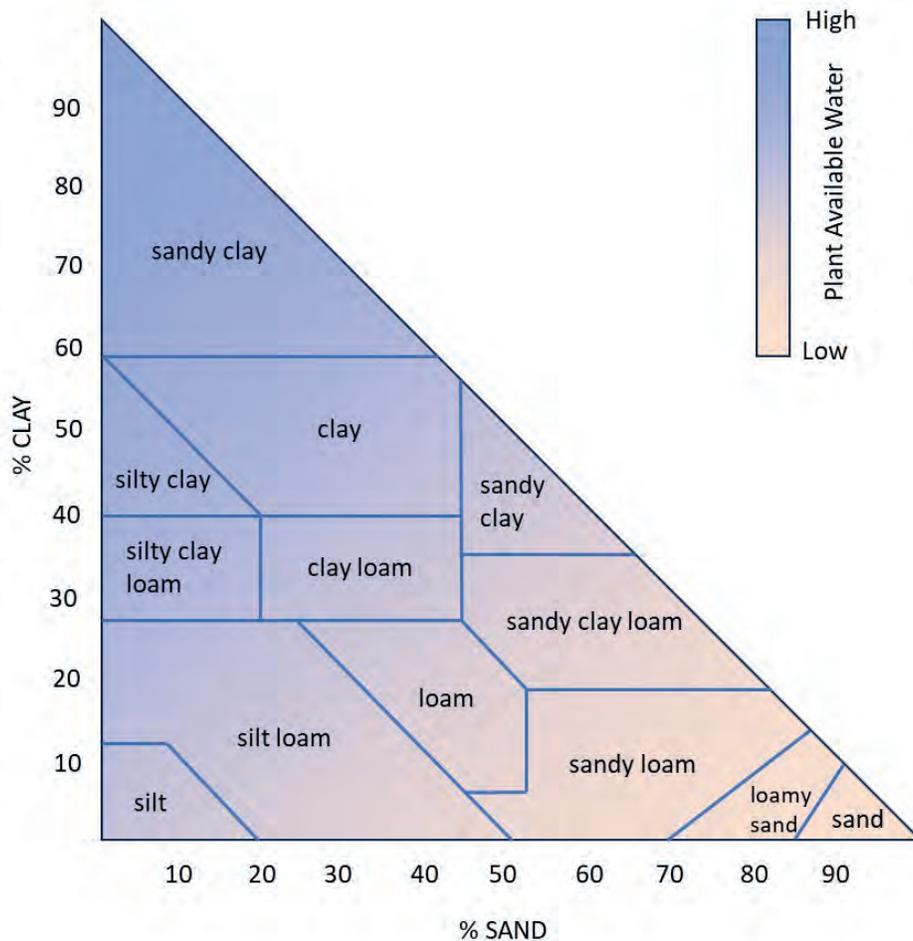
Interactions existantes entre le sol, la culture et l'eau

Pour programmer efficacement leur irrigation, les producteurs doivent comprendre les caractéristiques physiques de leur sol. Les caractéristiques physiques du sol déterminent les interactions entre le sol et l'eau et varient selon les propriétés inhérentes au sol, comme sa texture.

Le sol est constitué de trois phases différentes : solide, liquide et gazeuse. Les particules minérales et les matières organiques constituent la phase solide et occupent de 30 à 60 % du volume total du sol. De l'air et de l'eau se trouvent dans les interstices entre les particules solides du sol et occupent le reste du volume du sol, lequel est défini comme la porosité totale. La texture du sol détermine la taille, la forme

et la distribution des pores du sol. Le mouvement et la rétention de l'eau dans le sol dépendent de cette caractéristique du sol.

La réserve en eau utile du sol qui est disponible à la culture se trouve dans les espaces entre les particules de sol, et elle est variée selon la texture du sol (p. ex., sable ou argile), la teneur en matières organiques et le degré de compaction du sol. La texture du sol se définit par la détermination de son pourcentage de sable, de limon et d'argile (Figure 5). En outre, les caractéristiques du sol peuvent varier considérablement à l'intérieur d'un même champ, ce qui complique encore les choses.



Message à retenir :

La texture du sol est un facteur clé dans la programmation de l'irrigation, car elle influe sur la quantité d'eau qu'un sol peut stocker, laquelle à son tour, influe sur la réserve en eau utile à la croissance de la culture.

Cartographie de vos sols

Il est possible d'utiliser comme source documentaire initiale sur les propriétés du sol pour un endroit donné, comme la texture, des documents de certification de l'irrigation ou des cartes pédologiques publiées. Au cours du processus d'octroi de licences d'irrigation ou d'aménagement initial, une cartographie des sols peut être exigée par les organismes de réglementation provinciaux afin de déterminer si les terres se prêtent à l'irrigation; ces cartes peuvent constituer une source d'information précieuse pour la gestion de l'irrigation. La plupart des provinces fournissent des cartes pédologiques sur demande ou les offrent sur des portails en ligne :

Alberta – <https://soil.agric.gov.ab.ca/agrasidviewer/>

Saskatchewan – <https://sksis.ca/>

Manitoba – <https://www.gov.mb.ca/agriculture/soil/soil-survey/index.html>

Un levé pédologique est un inventaire des propriétés du sol (comme la texture, le drainage interne, la roche mère, la profondeur de la nappe phréatique, la topographie, le degré d'érosion, la pierrosité, le pH et la salinité) et de leur répartition spatiale dans un paysage. Les types de sols sont identifiés par des noms uniques qui présentent des caractéristiques spécifiques (p. ex., le sol Bradwell [abrégié BR] est un loam sableux très fin qui est classifié dans la zone des sols brun foncé). Il existe deux mises en garde majeures en ce qui concerne les limitations et l'adéquation des cartes pédologiques : leur échelle et la délimitation de leurs polygones.

Les contours des polygones sur les cartes pédologiques donnent à penser que les types de sol changent abruptement dans le paysage, mais en réalité le terrain présente des variations continues des types de sol. Les délimitations illustrées sur une carte pédologique ne sont donc que des approximations des endroits où existent ces transitions (figure 6).

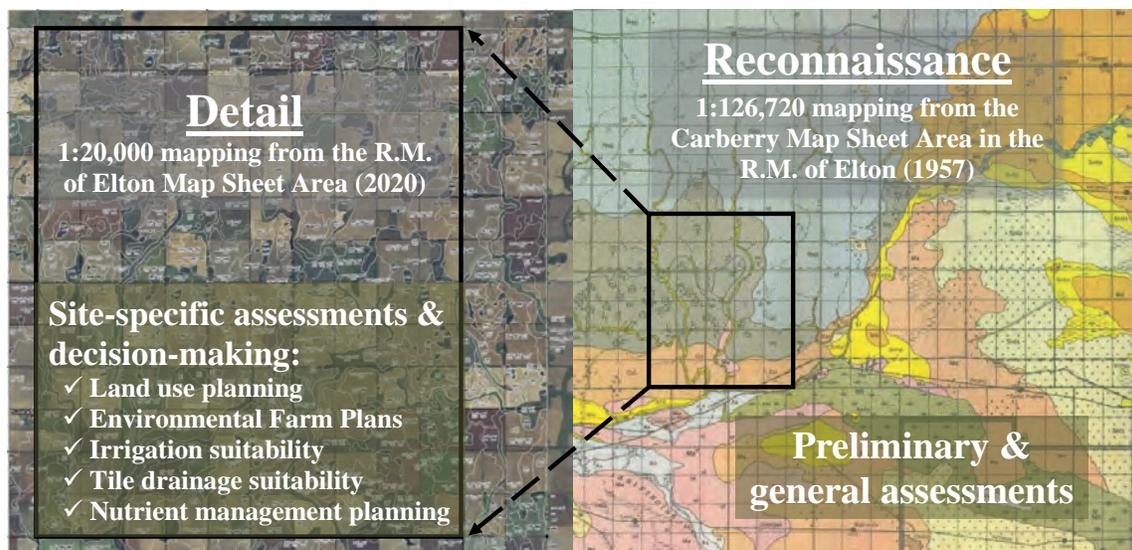


Figure 6. Différence d'échelle cartographique pour l'évaluation générale et l'aptitude à l'irrigation

L'échelle de la carte détermine la fiabilité de l'information qui est représentée sur une carte et son adéquation à une fin particulière. Les cartes à petite échelle ou de reconnaissance (p. ex., 1:125000) n'offrent qu'une vue d'ensemble des types dominants et de la répartition des sols sur une zone géographique relativement étendue. Cette limitation inhérente aux cartes découle du petit nombre d'inspections de sites qui ont été effectuées dans chaque section du terrain (environ six échantillons par

260 ha (640 acres) dans le cadre d'un levé de reconnaissance. Ces cartes sont donc plus utiles pour obtenir une indication préliminaire du type général de sol qui peut exister dans un lieu donné. En revanche, les cartes à grande échelle ou détaillées peuvent avoir une résolution suffisante pour permettre une évaluation et une gestion à l'échelle d'une ferme et d'un champ, en raison du plus grand nombre d'échantillons prélevés dans chaque section du terrain. Lorsqu'il est nécessaire de disposer de données détaillées de levés pédologiques, mais que celles-ci ne sont pas disponibles, il est possible de réaliser une étude pédologique des terres de la ferme, soit dans un but spécifique, comme pour connaître leur aptitude à l'irrigation, soit à des fins générales de gestion des terres à des fins agronomiques.

Pour améliorer la résolution des informations sur les sols d'un champ, prélevez des échantillons de sol supplémentaires dans l'ensemble du champ. Le nombre de sites d'échantillonnage dépend de la variabilité du terrain, du degré de précision requis et de votre budget. Plus la variabilité du terrain est grande, plus le nombre d'échantillons à prélever augmente, ce qui accroît le temps et les coûts du travail nécessaire.

Les échantillons de sol peuvent être prélevés à l'aide d'un certain nombre d'outils vendus sur le marché. Les outils courants comprennent un carottier Backsaver (Figure 7) et une tarière hollandaise. Les autres outils peuvent aller d'une simple bêche à une perceuse hydraulique montée sur camion (Figure 8).



Figure 7 . Prélèvement d'échantillons de sol à l'aide d'une tarière JMC Backsaver.



Figure 8. Perceuse et tarière hydrauliques montées sur tracteur.

Lorsque vous prélevez des échantillons de sol pour en déterminer la texture, il est important :

- i) de prélever un échantillon à une profondeur qui couvre la majeure partie de la rhizosphère de la culture (0,5 –1,0 mètre / 1,5 –3,0 pieds).
- ii) d'échantillonner l'ensemble du champ (en grille ou ciblés) selon la variabilité du champ.
- iii) d'échantillonner par tranches de profondeur (p. ex, 0–15, 15–30, 30–60 centimètres / 0–6, 6–12, 12–24 pouces) ou par horizons (strates de matériaux différents dans le profil du sol) à des fins d'analyses et de référence.
- iv) Prélevez un échantillon de sol assez gros pour les besoins d'analyse de laboratoire ou pour les besoins de la technique d'évaluation au toucher (Figure A1 de l'annexe A, page 71).

Vous pouvez déterminer la texture du sol vous-même au moyen du test tactile du boudin (Figure A1 de l'annexe A, page 71) ou faire appel à un agronome pour que l'on fasse une analyse pour vous (Figure 9). De plus, des informations sur les sols peuvent être incluses dans le cadre des processus provinciaux de développement et d'approbation de l'irrigation. Veuillez contacter le ministère de l'Agriculture de votre province pour vous renseigner sur les rapports qui ont été publiés (voir la section Aide offerte pour la programmation de l'irrigation, page 69).

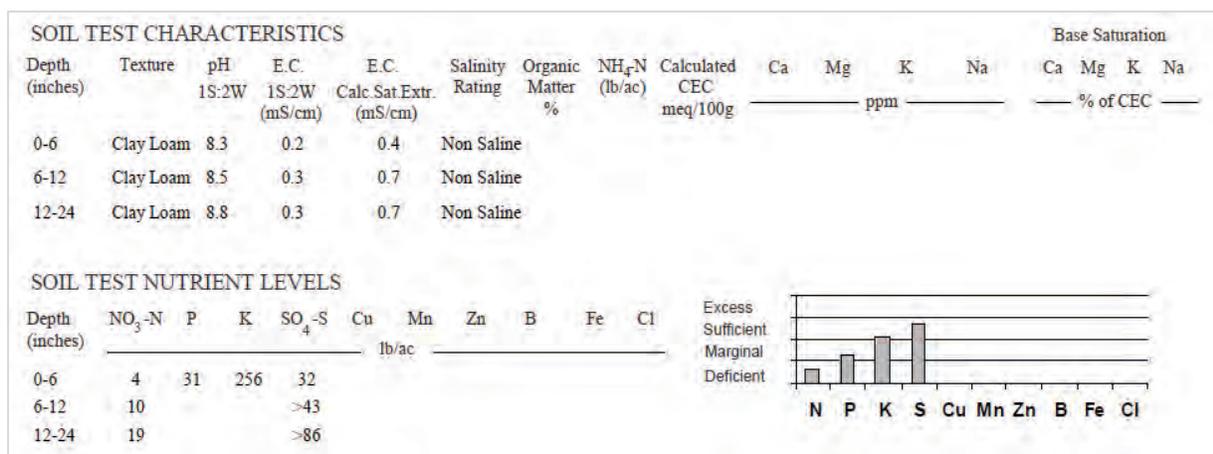


Figure 9. Exemple de rapport sur le sol montrant les caractéristiques inhérentes au sol (p. ex., la texture) et les variables dynamiques (p. ex., les teneurs en éléments nutritifs).

Message à retenir :

L'échantillonnage de sol est la seule méthode fiable pour déterminer la texture du sol de votre champ. Cela constitue la première étape de l'élaboration d'un plan de gestion en vue de réussir sa programmation de l'irrigation.

Classification des sols à des fins d'irrigation

Les gouvernements provinciaux établissent généralement une norme minimale pour l'aptitude des sols qui seront approuvés à des fins de développement de l'irrigation. Lorsqu'on détermine l'aptitude d'un sol à l'irrigation, on évalue si ses caractéristiques physiques et chimiques risquent d'entraîner une dégradation supplémentaire du sol s'il est irrigué ou si ces caractéristiques sont jugées incompatibles avec l'irrigation.

Au cours du processus de développement de l'irrigation, les organismes de réglementation provinciaux peuvent effectuer une étude des sols ou consulter des études publiées afin d'évaluer un certain nombre de caractéristiques basées généralement sur des analyses de laboratoire :

- i) Salinité - la salinité du sol est définie comme l'accumulation de sels solubles dans la zone racinaire. Ces sels augmentent la pression osmotique sur les plantes et augmentent leur stress hydrique, car elles ont alors plus de difficulté à extraire l'eau du sol. L'irrigation peut accroître la salinité du sol si elle est mal gérée, s'il y a une remontée de la nappe phréatique ou s'il y a apport de sels supplémentaires avec une eau d'arrosage de mauvaise qualité. La salinité du sol est évaluée en mesurant la conductivité électrique (CE) d'une pâte saturée préparée à partir d'un échantillon de sol. Une valeur de CE inférieure à 4 dS/m est jugée acceptable, tandis que des valeurs supérieures à ce niveau sont considérées comme modérément à sévèrement salines.
- ii) Sodicit  - les sols sodiques sont associés à des concentrations élevées de sodium échangeable dans le profil du sol, et de telles concentrations peuvent entraver la croissance des plantes (en raison de la toxicité du sodium) et dégrader la structure du sol. Les sols à teneur élevée en sodium présentent une mauvaise structure, décrite dans leur forme la plus grave comme étant une structure *colonnaire* ou *prismatique*, et une densité qui entrave l'infiltration de l'eau et le développement des racines. La sodicité est quantifiée en calculant le rapport d'adsorption du sodium (RAS) d'une pâte saturée. Une valeur de RAS inférieure à 9 est considérée comme acceptable.
- iii) Drainage - les sols caractérisés par un mauvais drainage ne se prêtent généralement pas à l'irrigation, une condition qui est r v el e par un faible taux d'infiltration et une conductivité hydraulique saturée. Lorsqu'ils sont irrigués, ces types de sols présentent des niveaux élevés d'accumulations d'eau ou de ruissellement. Les sols présentant des couches peu perméables sont susceptibles de devenir saturés sous l'effet de l'irrigation, ce qui entraîne un manque d'aération nuisible à la santé racinaire des plantes qui se traduit par une faible productivité de la culture.

D'autres caractéristiques du sol sont également prises en compte aux fins de l'approbation d'un projet d'irrigation d'une parcelle de terre. L'examen des sols vise à s'assurer que les ressources en eau seront utilisées d'une manière durable. Les irrigants peuvent obtenir une autorisation conditionnelle d'irriguer s'ils mettent en œuvre un plan de restauration du sol. Un plan de restauration du sol comprend généralement des mesures comme l'amélioration du drainage dans le champ (généralement par des travaux de drainage souterrain) et l'utilisation d'amendements du sol ou la mise en œuvre d'un plan de lessivage des sels afin de mettre en état le sol.

Classification des eaux d'irrigation

La qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation est un facteur important qui peut impacter la santé des plantes et du sol. Il est essentiel d'adapter la qualité de l'eau d'irrigation au sol sur lequel elle doit être appliquée afin d'éviter des échecs de culture et la dégradation potentielle du sol à long terme.

Les préoccupations à l'égard de la santé des plantes en lien avec la qualité de l'eau d'irrigation découlent surtout des effets toxiques des minéraux dissous ou de contaminants chimiques et biologiques. Les

préoccupations à l'égard de la santé des sols associées à l'eau d'irrigation découlent du fait que la structure du sol peut se dégrader par suite de l'accumulation de sels de sodium et de la salinisation.

Le Conseil canadien des ministres de l'Environnement a élaboré des lignes directrices concernant les ions majeurs, les ions de métaux lourds et traces, des paramètres biologiques et les pesticides (Tableau A1 de l'annexe A, page 71). Les paramètres relatifs à la qualité de l'eau qui sont les plus préoccupants pour la santé des sols sont le rapport d'adsorption de sodium (SAR) et la salinité, comme définis par la conductivité électrique (CE) ou les matières dissoutes totales (MDT).

Rapport d'adsorption du sodium (RAS)

La teneur excessive en sodium dans l'eau d'irrigation par rapport aux teneurs en calcium et en magnésium ou par rapport à la teneur en sels totaux peut avoir influer négativement la structure du sol et réduire la vitesse à laquelle l'eau pénètre dans le sol et le traverse (perméabilité, infiltration), en plus de diminuer l'aération du sol. Lorsque le calcium est le cation prédominant, le sol a tendance à avoir une structure granuleuse, facile à travailler et perméable. Le sodium peut avoir une incidence négative sur la condition physique du sol, de sorte que lorsque le sol est humide, il sépare et disperse les particules d'argile qui vont descendre dans le sous-sol pour former une couche imperméable qui limite le mouvement de l'eau. Lorsque le sodium adsorbé dépasse 10 à 15 % du total des cations, les particules d'argile se dispersent, ce qui donne un sol sujet à former des flaques d'eau lorsqu'il est humide, réduisant la perméabilité du sol et formant une croûte dure et imperméable lorsque le sol est sec. L'ampleur de l'effet d'une concentration excessive de sodium peut être liée aux proportions relatives des ions de sodium, de calcium et de magnésium dans l'eau d'irrigation, telles que définies par le RAS (Équation 1 de l'annexe C, page 82).

Salinité

La salinité de l'eau est mesurée par la conductivité électrique (CE) ou par les matières dissoutes totales (MDT). La CE est exprimée en milliSiemens par centimètre (mS/cm), tandis que les MDT sont exprimées en milligrammes par litre (mg/l). En général, 1 mS/cm de CE équivaut à 640 mg/l de MDT, mais cette valeur peut être aussi élevée que 1 000 mg/l. Toute eau apportée par arrosage ajoute des sels au sol. L'irrigation avec une eau à CE élevée a un effet de salinisation du sol. Pour contrer cet effet, il faut arroser en apportant une quantité d'eau supérieure aux besoins de la culture, qu'on appelle besoin de lessivage ou fraction de lixiviation.

Fraction de lixiviation

La quantité d'eau nécessaire pour lessiver les quantités excédentaires de sels dans le sol, appelée besoin de lessivage, dépend de la teneur en sels de l'eau d'irrigation et de la salinité moyenne du sol que les plantes cultivées sont capables de tolérer (Tableau A2 de l'annexe A, page 72). En connaissant la qualité de votre eau d'irrigation et la tolérance des cultures que vous voulez irriguer, vous pouvez calculer votre besoin de lessivage et la quantité d'eau à appliquer en vous basant sur les estimations de l'évapotranspiration locale (Exemple 3 de l'annexe D, page 83). La clé pour maintenir les concentrations de sel à des niveaux acceptables dans le sol est d'apporter un peu plus d'eau que ce qui est perdu dans l'atmosphère par évaporation et transpiration, car cela aidera à lessiver les sels à un niveau inférieur à la zone racinaire.

Les approvisionnements en eau d'irrigation très utilisés sont fréquemment analysés pour déterminer leur adéquation pour l'irrigation. Les irrigants privés disposant de sources d'eau ponctuelles (puits,

étangs) doivent faire tester périodiquement leur eau d'irrigation, car sa qualité peut changer au fil du temps.

Les autres facteurs associés à la qualité de l'eau d'irrigation comprennent notamment la concentration de pathogènes, laquelle est particulièrement importante lorsqu'il s'agit d'irriguer des cultures horticoles, qui peut exiger un prétraitement, et la concentration élevée d'algues, laquelle peut faire boucher les pompes et les buses d'arrosage. Ce problème est généralement réglé par l'installation d'une grille d'entrée d'eau ou d'un système de filtration lorsque le système est sujet au colmatage (micro-irrigation, irrigation goutte-à-goutte).

Chaque province des Prairies aura ses propres exigences, moyens de contrôle et lignes directrices concernant l'utilisation de l'eau destinée à l'irrigation. Pour avoir accès à ces informations, consultez les sites en ligne suivants, qui contiennent les informations les plus récentes :

Alberta

<https://www.alberta.ca/irrigation-strategy>

Manitoba

<https://www.gov.mb.ca/sd/water/water-rights/water-use/index.html>

Saskatchewan

<https://www.saskatchewan.ca/business/agriculture-natural-resources-and-industry/agribusiness-farmers-and-ranchers/crops-and-irrigation/irrigation>

Caractéristiques des sols et de l'eau

Il est essentiel de comprendre les caractéristiques du sol et de l'eau suivantes pour concevoir et mettre en œuvre un programme d'irrigation :

- **Capacité au champ** : quantité d'eau qu'un sol peut retenir après écoulement par gravité. Aussi appelée capacité de rétention en eau.
- **Dessèchement maximal permis** : Taux d'humidité du sol fixé comme seuil de déclenchement de l'irrigation. Ce taux doit être au-dessus du point de flétrissement permanent.
- **Point de flétrissement permanent** : Quantité d'eau dans le sol sous laquelle les plantes subiront des dommages permanents.
- **Réserve en eau utile** : Quantité d'eau se situant entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent (= capacité au champ – point de flétrissement permanent)
- **Saturation** : Quantité maximale d'eau qu'un sol peut contenir lorsque tous les espaces interstitiels sont remplis.
- **Capacité de rétention d'eau** : Voir la capacité au champ.

(Voir l'encadré : Définitions de termes se rapportant aux sols, aux cultures et à l'eau, page 16).

En général, plus les particules de sol sont grosses (p. ex., sable), moins il y a d'eau disponible pour les plantes, à la capacité au champ. Inversement, les sols à texture fine ont plus d'eau disponible pour les

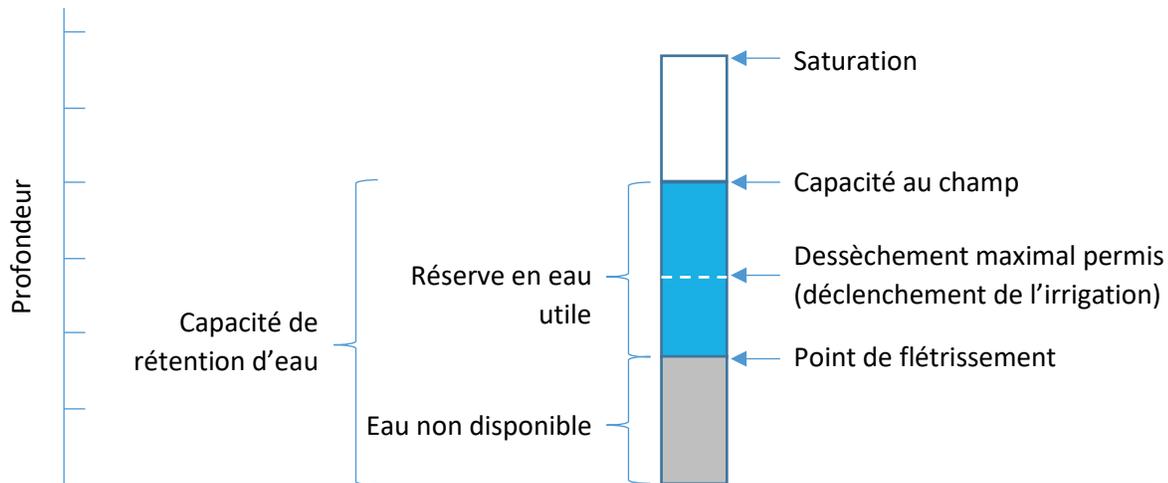


Figure 10. Illustration des relations hydriques d'un sol générique en termes de réserve en eau utile et d'eau non disponible pour les plantes.

plantes à la capacité au champ (Figure A2 de l'annexe A, page 72). Cependant, les sols de texture fine sont également enclins à des problèmes d'engorgement (dû à un mauvais drainage) et de compaction, alors que les sols de texture grossière n'ont généralement pas ces problèmes.

Les programmes d'irrigation sont conçus de manière à maintenir les niveaux d'humidité du sol dans la « zone sans risque » pour les plantes. L'irrigation est généralement déclenchée à un niveau d'humidité du sol défini comme le **dessèchement maximal permis** dans la zone d'enracinement de la culture (Exemple 4 de l'annexe D, page 83). Le dessèchement maximal permis est généralement fixé à 50 % de la réserve en eau utile (c.-à-d. bien au-dessus du point de flétrissement permanent) pour réduire l'incidence du stress hydrique des plantes attribuable à une faible humidité disponible (Figure 10; Tableau A2).

Message à retenir :

Une fois que vous avez fixé le dessèchement maximal permis et que vous savez comment la profondeur d'enracinement de la culture évolue au cours de la saison végétative, vous pouvez calculer la quantité d'eau à maintenir dans le sol. Ces informations constituent la base de l'élaboration d'un programme d'irrigation.

Définitions de termes se rapportant aux sols, aux cultures et à l'eau

Eau capillaire : voir Réserve en eau utile aux plantes.

Capacité au champ : la teneur en eau du sol une fois que l'excès d'eau s'est drainé du profil du sol par gravité. On mesure généralement la capacité au champ deux jours après un arrosage. Aussi appelée « Capacité de rétention d'eau ».

Dessèchement maximal permis : dans un programme d'irrigation, l'humidité du sol doit être gérée ou maintenue au-dessus du point de flétrissement permanent. Les plantes commencent à subir un stress hydrique lorsque le niveau de l'eau s'approche du point de flétrissement permanent. En pratique dans la plupart des cultures, le dessèchement maximal permis est fixé en général à 50 % de la réserve en eau utile (NRCS, 2005).

Point de flétrissement permanent : les plantes tirent l'eau du sol par succion (pression négative). Lorsque le niveau d'eau est inférieur à la capacité de la plante d'extraire l'eau par succion, la plante souffre d'un stress hydrique et, si la situation n'est pas corrigée immédiatement, la plante subira des dommages permanents (elle se flétrira de manière irréversible et mourra peut-être).

Réserve en eau utile : volume d'eau situé entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent (syn. eau capillaire).

Espace interstitiel : volume de sol non occupé par des matières solides. Les espaces interstitiels sont remplis d'une combinaison d'air et d'eau. La taille moyenne des pores est liée aux caractéristiques physiques du sol comme la taille des particules (grosses particules = gros espaces interstitiels), la composition de la matière organique et la compaction [aux fins de la programmation de l'irrigation, on suppose une absence de compaction].

Saturation : teneur en eau du sol lorsque tous les espaces interstitiels sont remplis d'eau. Il n'y a pas d'air dans le sol et si l'eau n'est pas drainée, la culture sera endommagée.

Besoins hydriques des cultures

Les besoins quotidiens et globaux en irrigation d'une culture varient selon la culture, la variété, le stade phénologique, l'état de la culture, la gestion des éléments nutritifs et les conditions météorologiques.

Au quotidien, la consommation d'eau de la culture augmente au fur et à mesure de son développement et de sa maturation. Chez les cultures annuelles, la consommation quotidienne d'eau de la culture culmine pendant les périodes critiques de la floraison et de la formation des graines (Figure 11). Chez les cultures vivaces, la consommation d'eau est maximale après une coupe ou un pâturage. La consommation saisonnière d'eau de la culture (aussi appelée *évapotranspiration saisonnière*) est la somme des prélèvements quotidiens d'eau par la culture pendant la saison pour soutenir sa croissance et son refroidissement.

Dans diverses régions, on dresse des graphiques des consommations quotidiennes d'eau des principales cultures, en tenant compte des conditions climatiques locales (en supposant que l'humidité du sol n'est pas un facteur limitatif). La consommation d'eau est représentée sous forme de courbe,

car la consommation d'eau quotidienne évolue au cours de la saison de croissance à mesure que la culture se développe. La consommation quotidienne d'eau est généralement très réactive aux conditions météorologiques (p. ex., la température, la vitesse du vent, l'humidité, la couverture nuageuse, l'intensité lumineuse) et peut varier considérablement à court terme (c.-à-d. d'une journée à l'autre). Ces différences de consommation sont représentées sur les graphiques de consommation d'eau des cultures par des courbes de consommation d'eau élevée, moyenne et faible (Figure 11).

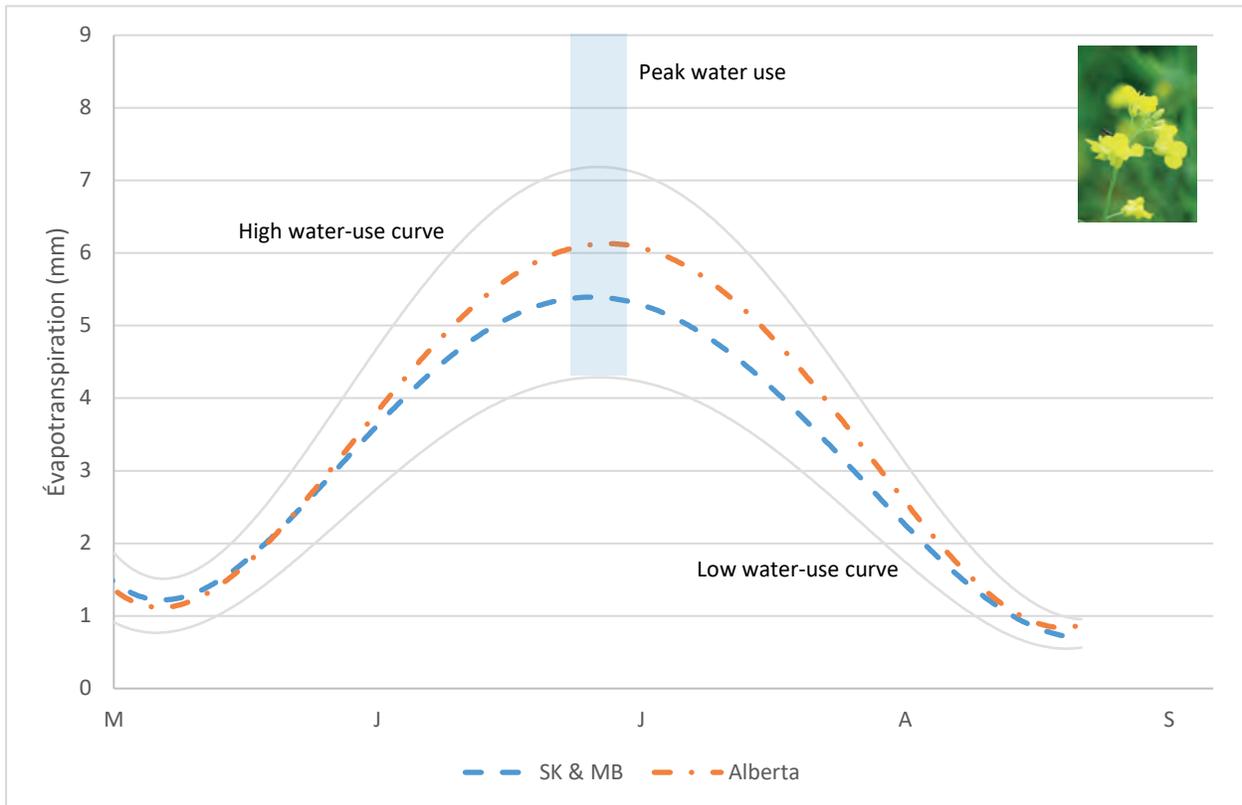


Figure 11. Consommation quotidienne d'eau du canola basée sur les données climatiques de 2014 à 2023 à Outlook (Sask.), à Carberry (Man.) et à Lethbridge (Alb.). (Des courbes de consommation d'eau spécifiques à d'autres cultures sont présentées à l'annexe B.)

Outre la compréhension de la manière dont la consommation d'eau varie selon le stade phénologique de la culture, la profondeur d'enracinement est un autre facteur important à considérer dans la détermination de la quantité d'eau à apporter. À mesure que la culture se développe pendant la saison, les racines actives descendent plus profondément dans le sol (Figure 12; Tableau A4 de l'annexe A, page 73). Cela signifie qu'à mesure que la zone racinaire se développe, la plante a accès à un plus grand volume de sol et potentiellement à de plus grandes ressources hydriques. En même temps, cela signifie que vous avez une plus grande profondeur de sol à gérer pour vous assurer d'apporter suffisamment d'eau pour humidifier l'ensemble de la zone racinaire. Notons que les cultures puisent environ 70 % de leur eau par la moitié supérieure de leurs racines actives. Il est donc important de pas laisser cette partie de la zone racinaire s'assécher, même s'il y a suffisamment d'eau en profondeur (Figure 12).

Un système d'irrigation bien conçu doit pouvoir répondre aux besoins hydriques de la culture, et comprendre une marge de sécurité qui tient compte des temps d'arrêt et de l'inefficacité du système d'irrigation. À noter que la quantité d'eau qu'il est possible d'appliquer en un seul arrosage peut être limitée par la manière dont le système a été conçu. En outre, le temps requis pour effectuer un arrosage

est souvent suffisamment important pour en tenir compte dans les programmes d'irrigation (Les arrosages doivent être programmés en prenant en compte leur temps d'application).

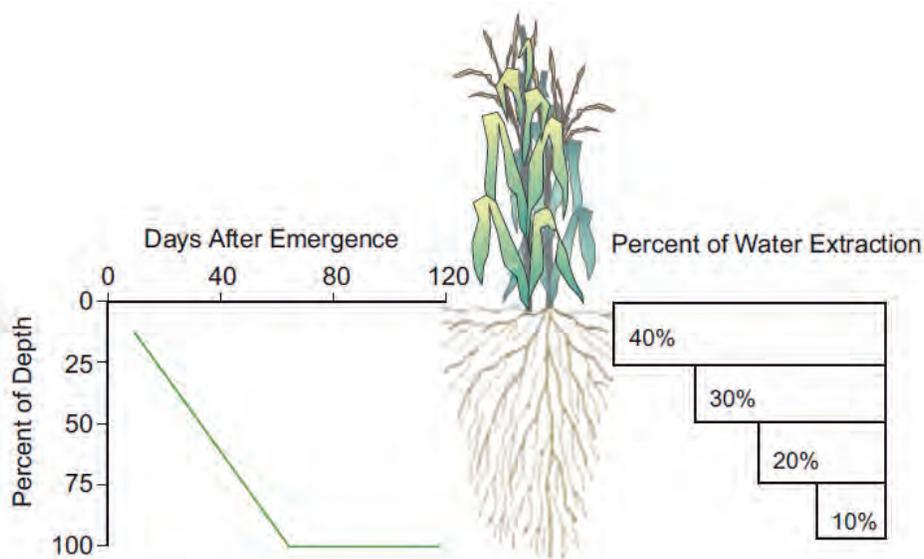


Figure 12. Extraction efficace de l'eau du sol dans la zone racinaire et développement des racines des plantes (utilisé avec la permission de l'Université du Nebraska à Lincoln).

Des tableaux sur les débits d'arrosage sont disponibles auprès du fabricant et doivent être pris en compte lors de la détermination de la profondeur d'irrigation à effectuer, car la culture continuera à consommer de l'eau tout le temps que met le pivot à faire une révolution. Ce facteur est souvent omis dans les programmes d'irrigation. Le tableau A6 de l'annexe A (page XX) présente les profondeurs d'arrosage d'un pivot central à basse pression pour différents débits et durées de cycles (Exemple 5 de l'annexe D, page 84).

En outre, l'efficacité du système varie selon la méthode d'irrigation. Par exemple, l'efficacité d'un système d'irrigation à pivot central qui fonctionne à haute pression peut n'être que de 80 %, tandis que celle d'un système d'irrigation goutte-à-goutte est de 90 % ou plus. La conversion en un système d'irrigation plus efficace permet d'appliquer plus d'eau au sol pendant la même durée (Exemple 6 de l'annexe D, page 84).

Systemes d'irrigation et impacts sur les programmes d'irrigation

Actuellement, les types et méthodes d'irrigation varient considérablement au Canada. Ils vont de la méthode archaïque consistant à inonder un champ au moyen d'un canal ou d'un système de tuyaux aux systèmes plus avancés d'irrigation à débit variable et de goutte-à-goutte sous la surface. Lors de l'élaboration d'un programme d'irrigation, il est important de tenir compte du système et de la méthode d'irrigation qui seront employés dans votre exploitation agricole.

Les composants du système d'irrigation (pompe, canalisation, irrigateur) sont généralement dimensionnés pour fournir suffisamment d'eau afin de répondre à la demande de pointe des types de

cultures pratiquées dans votre région. Par conséquent, pendant les périodes de croissance maximale et lorsque des conditions de chaleur et de sécheresse prévalent, votre système d'irrigation peut devoir fonctionner en continu afin d'arroser suffisamment pour répondre aux besoins hydriques des cultures. Un programme d'irrigation approprié en début de saison vous aidera à maintenir les réserves d'humidité du sol afin d'assurer une certaine marge de manœuvre pendant les périodes de croissance maximale.

Le type de système d'irrigation influe sur la programmation de l'irrigation de deux manières importantes :

- i) le temps d'application;
- ii) l'efficacité d'application.

Temps d'application - Les systèmes d'irrigation à déplacement mécanique (pivot, latéral, roue, etc.) ont besoin de temps pour avancer dans un champ lorsqu'ils sont actionnés. Les systèmes d'irrigation ne peuvent appliquer l'eau qu'au débit pour lequel ils ont été conçus selon la capacité de pompage et la vitesse de déplacement, comme c'est le cas pour le mouvement mécanique. Il est important que votre système d'irrigation applique l'eau à une vitesse appropriée pour la vitesse d'infiltration de vos sols, car une vitesse d'application trop élevée peut provoquer la formation de flaques d'eau, favoriser le ruissellement et réduire l'efficacité de l'application. En outre, certains systèmes d'irrigation (à déplacement latéral, à déplacement sur roues) nécessitent des temps d'arrêt pour transférer le système d'irrigation d'un lieu à un autre ou pour changer les raccordements des canalisations; il est important que ces temps d'arrêt (sans irrigation) soient pris en compte lors de la programmation de l'irrigation. Cela peut exiger un apport supplémentaire d'eau, afin de ne pas prendre de retard par rapport aux besoins d'irrigation.

Efficacité d'application - L'efficacité d'application du système d'irrigation est déterminée par la quantité d'eau qui atteindra le sol et sera disponible pour la culture. L'efficacité des applications varie considérablement selon le type de système d'irrigation utilisé (Tableau A4). Des pertes d'eau peuvent se produire par ruissellement, drainage en profondeur, évaporation et dérive. Ainsi, l'irrigant doit appliquer une quantité supplémentaire d'eau pour prendre en compte les pertes anticipées dans l'environnement.

Message à retenir :

1. N'appliquez que la quantité d'eau nécessaire à votre culture

On détermine la profondeur d'irrigation, soit en mesurant la teneur en eau du sol, soit en estimant la consommation d'eau de la culture depuis la dernière irrigation. Chaque arrosage doit augmenter la teneur en eau du sol à la capacité au champ.

2. Connaissez la profondeur de sol à gérer

La profondeur à laquelle l'humidité du sol doit être gérée (par irrigation) fluctue tout au long de la saison de croissance, au fur et à mesure que la culture se développe et que les racines descendent plus profondément dans le sol. Par exemple, au début de la saison, la profondeur d'enracinement d'une culture peut être de 7,5 –15 centimètres (3–6 pouces), tandis qu'en fin de saison, elle peut être de 90 centimètres (3 pieds).

3. Choisissez un système d'irrigation en fonction de votre culture la plus gourmande en eau

En grandes cultures dans les Prairies, les rotations culturales pluriannuelles sont la norme. Le système d'irrigation que vous choisissez doit être capable de combler en 24 heures les besoins de la culture de votre rotation qui est la plus gourmande en eau au pic de sa consommation. Pendant cette période critique, il se peut que le système d'irrigation doive fonctionner en continu pour combler les besoins hydriques de la culture (Figure 11).

4. Les opérations d'irrigation prennent du temps

Tenez compte du temps nécessaire au système d'irrigation pour apporter la quantité d'eau voulue et des temps d'arrêt associés aux déplacements et aux éventuelles opérations de maintenance et de réparation.

Différences régionales

Les régimes de précipitations et d'évaporation peuvent varier considérablement dans les provinces des Prairies, sculptant le paysage hydrologique unique de la région. Les plus grandes superficies irriguées au Canada se trouvent dans la région du Triangle de Palliser. Le Triangle de Palliser est une région semi-aride d'environ un million d'acres, couvrant la majeure partie du sud de l'Alberta et de la Saskatchewan et une partie du sud-ouest du Manitoba. Cette région se caractérise par des précipitations globales plus faibles, une grande partie tombant sous forme neigeuse pendant les mois les plus froids. Les taux d'évaporation sont affectés par des facteurs comme la température, le vent, l'humidité et la couverture des plans d'eau. En général, les hivers froids et les saisons de croissance relativement courtes des provinces des Prairies contribuent à faire varier les taux d'évaporation dans l'ensemble de la région. Ces interactions complexes entre les particularités géographiques, le climat et les régimes météorologiques locaux se traduisent par une tapisserie de régimes de précipitations et d'évaporation qui définissent la disponibilité de l'eau et les écosystèmes des provinces des Prairies.

Le climat et les régimes météorologiques qui en découlent varient considérablement dans la région; les précipitations pendant la période de végétation (Figure 13) sont généralement insuffisantes pour répondre aux besoins hydriques des cultures dans la majorité des prairies, d'où la dépendance aux eaux de la fonte des neiges ou à l'irrigation. Les besoins en irrigation varient considérablement; le sud de

l'Alberta dépend plus de l'irrigation pour l'ensemble de ses productions végétales que le sud du Manitoba, partie de la province où l'irrigation permet une diversification des cultures (p. ex., l'horticulture) et assure la productivité de cultures à valeur plus élevée. Comme on s'attend à ce que le changement climatique augmente la variabilité des précipitations saisonnières (inondations et sécheresses), il faudra adapter davantage les programmes d'irrigation d'une année à l'autre.

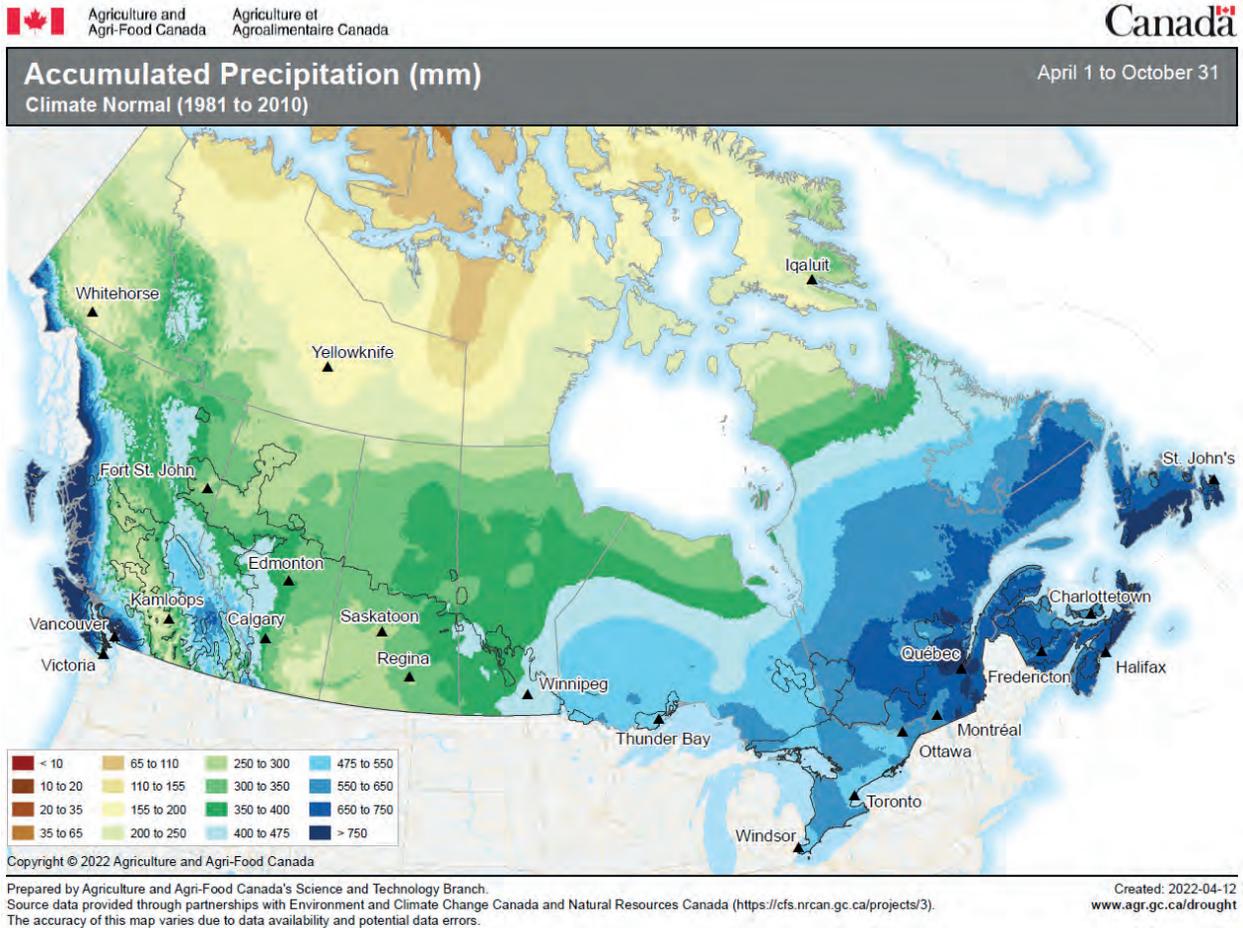


Figure 13. Historique des précipitations accumulées durant la saison végétative au Canada, de 1981 à 2010 (Gouvernement du Canada, 2022)

Les différences de précipitations et de climat entre les régions sont aggravées par les variations des sols cultivés dans les provinces des Prairies (Figure 14). Il existe une grande variété de sols dans les prairies, mais dans les régions agricoles, les sols prédominants sont les sols chernozémiques bruns, brun foncé et noirs; ces couleurs varient selon la teneur en matières organiques qui est le résultat des conditions d'humidité qui ont existé depuis la dernière glaciation. Historiquement, l'irrigation était pratiquée dans la zone des sols bruns à texture plus grossière, mais depuis la variabilité accrue des régimes de précipitations et l'augmentation de la production de cultures de valeur plus élevée (p. ex., l'horticulture), l'irrigation s'est étendue à la plupart des superficies agricoles. Les programmes d'irrigation élaborés dans la région varieront et devront être basés sur les climats locaux, les sols et les pratiques culturales.

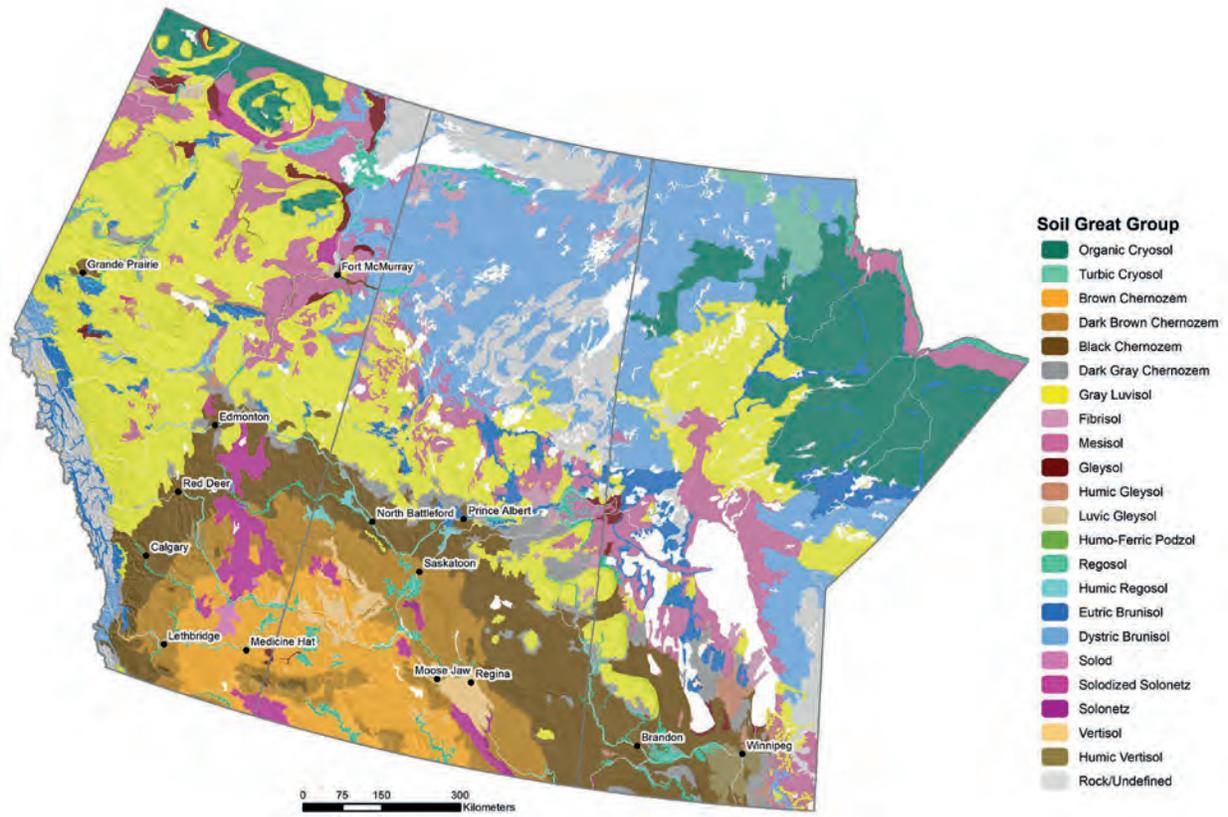


Figure 14 . Carte des grands groupes de sols des provinces des Prairies (D. Cerkowniak, Agriculture et Agroalimentaire Canada).

MISE EN CONTEXTE : PROGRAMMES D'IRRIGATION

En général, la programmation de l'irrigation couvre à la fois le MOMENT et la PROFONDEUR des arrosages tout au long de la saison végétative. Par souci de simplification des opérations, les irrigants programment généralement leur irrigation en fixant l'une des deux variables (le MOMENT ou la PROFONDEUR d'irrigation) et en mesurant ou en calculant l'autre.

- i) **MOMENT** : Dans les arrosages à intervalles fixes, la quantité d'eau apportée variera en fonction des besoins hydriques journaliers de la culture. Les arrosages à intervalles fixes sont pratiques lorsque l'eau est acheminée par des canaux d'irrigation et commandée à l'avance.
- ii) **PROFONDEUR** (ou dessèchement du sol) : dans les arrosages à profondeur fixe, l'intervalle entre les arrosages est déterminé en fonction de la consommation d'eau ou des besoins hydriques de la culture. Les programmes d'irrigation à profondeur fixe simplifient les opérations de gestion du système (c.-à-d. paramétrage fixe du pivot = une même quantité d'eau est appliquée à chaque arrosage).

Que votre système de programmation de l'irrigation fonctionne selon une durée fixe ou une profondeur fixe, vous devez surveiller ou estimer les besoins d'irrigation. Vous pouvez généralement utiliser trois approches pour déterminer ces besoins.

- i) **Approche basée sur le sol** : consiste à mesurer ou à estimer l'humidité du sol.
- ii) **Approche basée sur les données météorologiques** : consiste à estimer la consommation d'eau de la culture à partir des données météorologiques (température, humidité, vent, rayonnement solaire, etc.).
- iii) **Approche basée sur les plantes** : consiste à estimer la consommation d'eau de la culture à l'aide de données sur la réponse des plantes et de modèles météorologiques.

Irrigation déficitaire

La pénurie d'eau est devenue une préoccupation urgente qui touche des régions du monde entier, y compris les Prairies canadiennes. En général, les programmes d'irrigation sont conçus pour limiter au minimum le stress hydrique des cultures, en partant du principe que les réserves d'eau ne sont pas un facteur limitant. Le principe de l'irrigation déficitaire reconnaît la variabilité de la disponibilité de l'eau et se concentre à optimiser l'utilisation de l'eau pour assurer des pratiques agricoles durables à long terme.

Avantages de l'irrigation déficitaire :

1. Conservation de l'eau : L'irrigation déficitaire favorise l'utilisation responsable des ressources en eau en réduisant la consommation d'eau inutile. En n'apportant aux cultures qu'une fraction de leurs besoins hydriques totaux, les producteurs peuvent utiliser l'eau disponible en arrosant en priorité les cultures de valeur plus élevée ou irriguer les mêmes superficies de terres avec des approvisionnements d'eau réduits.
2. Effets bénéfiques du stress induit sur les plantes : L'exposition des cultures à un stress hydrique contrôlé par la pratique d'une irrigation déficitaire peut déclencher une série de réponses

physiologiques chez les plantes. Ces réponses sont notamment une amélioration du développement racinaire et un accroissement du rapport racines-pousses, et ces effets se traduisent par une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau.

3. Allocation des ressources et qualité des récoltes : L'irrigation déficitaire force les plantes à modifier l'affectation de leurs ressources en les concentrant moins sur la croissance végétative et plus sur les processus reproductifs de la floraison et du développement des fruits. Ce changement peut améliorer la qualité des cultures et réduire l'incidence des dommages causés par les ravageurs et les maladies.

L'irrigation déficitaire nécessite d'adopter une approche stratégique qui consiste à comprendre les besoins hydriques spécifiques des cultures, à irriguer en priorité durant les stades de croissance critiques et à réduire les apports d'eau en dehors de ces périodes. Les éléments clés d'une stratégie d'irrigation déficitaire sont les suivants :

1. Type de culture : Connaître les besoins hydriques saisonniers (c.-à-d. besoins totaux) spécifiques de chacune des cultures (Tableau A9, page 75) et leurs stades de croissance critiques.
2. Stades de croissance : Tenir compte des besoins hydriques aux différents stades de croissance d'une culture. Cette information est disponible auprès des services provinciaux de vulgarisation ou peut être estimée à partir des courbes de consommation d'eau des cultures (annexe B).
3. Seuil de déficit : Déterminez le niveau de déficit hydrique que vous êtes prêt à accepter. Les niveaux de déficit les plus courants se situent entre 50 et 80 %. Appliquez les niveaux de déficits hydriques pendant la saison végétative, sauf pendant les stades de croissance critiques. Cela permettra de préserver l'eau tout en réduisant au minimum les impacts sur le rendement et la qualité des récoltes.
4. Tenue de registres et analyse : Tenez des registres détaillés de vos programmes d'irrigation, des conditions météorologiques et des réponses des cultures. Au fil du temps, analysez ces données pour affiner votre stratégie d'irrigation déficitaire afin d'obtenir des résultats optimaux.
5. Consultation d'experts : Si l'irrigation déficitaire ou certaines cultures sont nouvelles pour vous, vous pourriez demander conseil à des conseillers agricoles experts dans le domaine ou à des services provinciaux de vulgarisation agricole. Ils peuvent fournir des informations précieuses qui sont adaptées à votre situation spécifique.

N'oubliez pas que pour obtenir de bons résultats avec l'irrigation déficitaire, vous devrez surveiller attentivement vos cultures, adapter vos programmes d'irrigation et comprendre les besoins spécifiques de vos cultures et les particularités des conditions environnementales locales. L'irrigation déficitaire peut s'avérer un outil efficace pour conserver l'eau tout en maintenant des rendements acceptables, mais elle nécessite une approche proactive et éclairée. En apportant stratégiquement moins d'eau que les besoins hydriques maximaux des cultures, les agriculteurs peuvent conserver l'eau, améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau et cultiver des plantes plus adaptables aux conditions climatiques changeantes.

Utilisation de capteurs pour mesurer ou estimer les besoins hydriques des cultures

[Remarque : la présente section constitue une introduction aux divers types de capteurs.]

Pour programmer l'irrigation afin de combler les besoins hydriques de la culture, vous devez prendre en compte l'état d'humidité réel du sol ou estimer la consommation d'eau de la culture depuis le dernier

arrosage. Cela exige des visites sur place et une collecte de données qui prennent beaucoup de temps. Les progrès technologiques accomplis dans les domaines de l'informatique et des communications ont rendu l'utilisation de capteurs plus pratiques et ont augmenté les applications possibles, facilitant ainsi la programmation de l'irrigation. Les capteurs peuvent surveiller, enregistrer et dans certains cas, transmettre automatiquement les degrés d'humidité du sol. Le placement des capteurs varie selon la technologie utilisée pour mesurer l'humidité du sol.

Types de capteurs

Capteurs in situ et capteurs portatifs

Parmi les capteurs vendus sur le marché, on trouve un plus grand choix dans les types de capteurs in situ et les capteurs portatifs. Cependant, même si ces capteurs sont économiques, l'utilisateur doit effectuer plusieurs lectures ou installer plusieurs capteurs dans un même champ pour bien estimer les besoins hydriques.

Choix du site : Choisissez dans le champ un ou plusieurs sites moyens ou représentatifs des propriétés du sol, de la topographie et de la productivité. Si vous choisissez un site typiquement humide (dépression ou sol de texture fine), les lectures tendront à sous-estimer les besoins d'irrigation ailleurs dans le champ. À l'inverse, si vous choisissez un site typiquement sec (coteau ou sol à texture grossière), les lectures tendront à surestimer les besoins d'irrigation. Si possible, choisissez un site facilement accessible (par le chemin d'accès ou dans le sillon de passage du pivot) pour causer le moins de dommages possible à la culture. Marquez l'emplacement du capteur avec des fanions ou enregistrez ses coordonnées GPS.

La recommandation générale pour l'implantation de capteurs d'humidité dans le profil du sol est de les placer au centre de la moitié supérieure de la profondeur maximale de la zone racinaire (p. ex., si la profondeur maximale à laquelle le canola peut extraire de l'eau est de 100 cm (39 po), placez le capteur à 25 cm (10 po) de la surface du sol). C'est dans cette zone que la culture prélève de 70 à 80 % de son eau. Cependant, au début de la saison, lorsque le système racinaire est encore peu développé et peu profond, il faut surveiller l'humidité du sol plus près de la surface du sol (p. ex., à 15 cm / 6 po de la surface). Si vos moyens le permettent, vous pourriez installer deux capteurs ou un capteur multiprofondeur par station de surveillance.

Télécapteurs

La mesure à distance de l'humidité du sol (ou d'un indicateur de l'humidité du sol, comme la productivité des plantes) signifie que nul besoin d'installer des capteurs dans le sol.

Capteurs montés sur le système d'irrigation : Les capteurs montés sur le système d'irrigation prennent de multiples mesures pendant que l'équipement d'irrigation se déplace dans le champ.

Capteurs embarqués sur satellite : Il est possible d'obtenir gratuitement des données de télédétection captées par des systèmes satellitaires exploités par le gouvernement ou d'acheter de telles données auprès de sociétés privées. Selon le satellite sur lequel ils sont embarqués, les capteurs mesurent différentes longueurs d'onde réfléchies par le sol (micro-ondes, images RVB, thermiques, etc.) à une résolution variable (pixels de 5 à 100 mètres). L'inconvénient des données obtenues par satellite est l'intervalle entre les passages. Selon le satellite, la fréquence de passage peut varier de quotidienne à hebdomadaire. En outre, la couverture nuageuse peut limiter grandement la qualité et la disponibilité des données.

Capteurs montés sur un véhicule aérien sans pilote (UAV ou drone) : Les capteurs montés sur des drones peuvent générer, à la demande, des données dont la résolution est excellente (< 1 mètre de pixel). Cette approche présente toutefois des limites : la capacité de charge physique d'un drone, les exigences en matière de traitement des données (traduction et stockage des données) et un logiciel ou un prestataire de services capable de traduire les données sous une forme utilisable (p. ex., cartes de l'humidité du sol ou des besoins d'irrigation) et le respect des règles de Transports Canada (formation obligatoire, acquisition d'une licence et couverture d'assurance).

Téléométrie

Comme dans d'autres industries, les capteurs utilisés en agriculture ont continué d'évoluer vers la communication sans fil, laquelle est accompagnée d'un accès aux données par une connexion internet. Les capteurs d'irrigation ne font pas exception à la règle, et de nombreux fournisseurs proposent des options radio et cellulaires pour l'accès à distance. La fiabilité du service et de la couverture cellulaire constitue une limite majeure dont il faut être conscient. Étant donné qu'une grande partie de l'équipement vendu sur le marché est d'origine étrangère, il est important de connaître les accords de service existant entre les télécommunications locales et les fournisseurs de capteurs; ces accords peuvent dicter la zone de couverture dans laquelle ces capteurs peuvent fonctionner.

Programmation de l'irrigation basée sur le sol

Chacun ayant des avantages et des inconvénients, les programmes d'irrigation basés sur le sol peuvent utiliser des approches directes ou indirectes pour mesurer ou estimer l'humidité du sol. Comme pour toute tentative de caractérisation de grandes superficies, il convient de collecter des données dans un même champ à plusieurs sites afin d'obtenir une estimation fiable de l'ensemble du champ.

Méthode gravimétrique de mesure de l'humidité du sol

La gravimétrie est une méthode fiable, car elle mesure directement l'humidité du sol. Ce processus intensif exige de sécher des échantillons de sol au four. Cette méthode est surtout utilisée pour vérifier périodiquement les autres méthodes de programmation et pour étalonner les capteurs d'humidité du sol.

AVANTAGES : méthode peu coûteuse, exacte.

INCONVÉNIENTS : exige de l'expérience, de nombreuses visites sur place, du temps.

Méthode : gravimétrique :

- 1. Repérez un ou plusieurs sites représentatifs dans votre champ.**
- 2. Au moyen d'une sonde pédologique (Figure 7), prélevez des carottes de sol par tranches de 15 à 30 centimètres (de 6 à 12 pouces) dans toute la zone racinaire.**
- 3. Conservez les échantillons dans des sacs de plastique distincts, étiquetés et étanches à l'air afin de limiter le plus possible les pertes d'eau par évaporation avant la pesée.**
- 4. Pesez l'échantillon de sol humide avec une balance et notez la valeur.**
- 5. Faites sécher l'échantillon de sol au four à 110°C (230°F) pendant 12-16 heures.**
- 6. Laissez l'échantillon refroidir avant de le peser à nouveau.**
- 7. Calculez l'humidité pondérale et convertissez-la en humidité volumique (Exemple 7A et 7B de l'annexe D, page 85).**
- 8. L'humidité du sol est-elle inférieure au dessèchement maximal permis?**

- a. Si Oui, allez à l'étape 9.
 - b. Si Non, échantillonnez à nouveau dans quelques jours.
9. Déterminez la profondeur d'irrigation (Exemple 7C de l'annexe D, page 85).
 10. Prenez en compte l'efficacité du système (Exemple 7D de l'annexe D, page 85).
 11. Irriguez au besoin.

Méthode de mesure de l'humidité du sol par une évaluation qualitative au toucher

La méthode d'évaluation qualitative de l'humidité du sol au toucher est exactement ce que son nom suggère : elle consiste à manipuler un échantillon de sol dans la paume de la main pour estimer approximativement l'humidité du sol. Il faut avoir de l'expérience pour estimer avec fiabilité la teneur en humidité du sol. Pour affiner la technique, il faut la répéter avec des échantillons qui ont diverses teneurs en humidité, car un sol donné se comporte différemment à différentes teneurs en humidité.

AVANTAGES : méthode peu coûteuse, facile à apprendre

INCONVÉNIENTS : il faut avoir de l'expérience pour obtenir des résultats exacts avec cette

Méthode : évaluation qualitative au toucher

1. Repérez un ou plusieurs sites représentatifs dans votre champ.
2. Au moyen d'une sonde pédologique (Figure 7), prélevez des carottes de sol par tranches de 15 à 30 centimètres (de 6 à 12 pouces) dans toute la zone racinaire.
3. Travaillez un échantillon de sol dans votre main pour estimer la teneur en humidité du sol (Tableau 1, Figure 15).
4. La plage d'humidité du sol est-elle inférieure au dessèchement maximal permis?
 - a. Si Oui, allez à l'étape 5.
 - b. Si Non, échantillonnez à nouveau dans quelques jours.
5. En fonction de la teneur en humidité du sol estimée, déterminez la profondeur d'irrigation (Exemple 8 de l'annexe D, page 81).
6. Irriguez.



Figure 15. Plages de réserve en eau utile du sol pour différentes textures de sol déterminées à l'aide de la

Tableau 1. Humidité du sol disponible pour les plantes pour des textures de sol communes, en se basant sur l'évaluation qualitative au toucher.

% d'humidité disponible pour les plantes*, **				
	Loam sableux	Loam	Loam argileux	Décision
0-25	sol sec, lâche, coule entre les doigts	sol poudreux ou se défaisant facilement en sol poudreux	sol dur, fissuré, difficile à se défaire en sol poudreux	Irriguez
25-50	sol d'aspect sec, ne formant pas de boule lorsque pétri	sol friable lorsque pétri, mais les particules demeurent ensemble	sol assez malléable, forme une boule lorsque pétri	

50-75	sol formant une boule lorsque pétri, mais qui maintient rarement sa forme lorsque maniée	sol formant une boule un peu plastique tachant légèrement les doigts lorsqu'il est pétri	sol formant une boule lorsqu'il est pétri, qui se déroulera en ruban sous une pression exercée entre le pouce et l'index, lisse au toucher	Humidité du sol suffisante
75-100	sol formant une boule fragile lorsqu'il est pétri, mais qui se brise facilement lorsqu'elle est maniée	sol formant une boule très malléable et tachant facilement les doigts lorsqu'il est pétri	sol se déroulant facilement en ruban, lisse au toucher	
Capacité au champ	Lorsqu'on comprime le sol, aucune eau libre ne s'en écoule. Le sol forme une boule qui laisse un contour humide dans la main et du sol colle aux doigts lorsqu'on le roule.			

* Ceci est une estimation approximative de l'humidité en fonction de la texture du sol : utilisez la classe de sol dont la texture est la plus proche de celle de votre échantillon.

** Il faut user de son jugement pour déterminer où l'humidité du sol se situe à l'intérieur de chaque plage d'humidité du sol.

Tiré de : *Estimating Soil Moisture by Feel and Appearance*, United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service, 1998.

Tensiomètre

Le fonctionnement du tensiomètre repose sur le principe du potentiel matriciel, ou tension, qui varie dans le sol en fonction de son taux d'humidité. À la capacité au champ, les racines d'une plante ont facilement accès à l'eau contenue dans le sol en devant fournir peu d'effort (suction). Au fur et à mesure que la teneur en humidité du sol diminue, les particules de sol « retiennent » plus fortement l'eau. Les plantes doivent donc exercer une plus grande force (suction) pour extraire l'eau du sol, ce qui leur cause un stress. Les tensiomètres mesurent cette suction et la traduisent en humidité équivalente du sol.

Le corps du tensiomètre est un tube solide dont le sommet est scellé et la base se termine par un embout en céramique (Figure 16). Après avoir installé le tensiomètre dans le sol, il faut remplir le tube d'eau, l'amorcer puis le refermer. L'embout en céramique permet le passage de l'eau du tube scellé au sol, ce qui crée un vide partiel. La jauge à vide située sur le dessus du tensiomètre indique la variation de la pression de suction. Lorsque la pluie ou l'irrigation humidifie le sol, de l'eau est ramenée dans le tensiomètre et cela réduit la pression de suction dans le tube.

En pratique, les tensiomètres peuvent seulement être utilisés pour lire certaines teneurs en eau du sol et ne fonctionnent que dans certaines textures de sol. À des teneurs en humidité élevées (capacité au champ) ou lorsque la texture du sol est grossière (sable), il y a de grandes variations du contenu en eau pour des variations relativement étroites de la tension mesurée (Figure 17), ce qui signifie que les appareils ne sont pas assez sensibles pour caractériser avec précision l'humidité du sol dans ces circonstances.

AVANTAGES : méthode peu coûteuse qui imite le stress exercé sur les racines des plantes

INCONVÉNIENTS : mesure indirecte; lectures peu fiables sur toute une gamme des pressions

Méthode : Tensiomètre

1. Faites tremper l'embout du tensiomètre pendant 24 heures avant son installation.
2. Gardez l'embout humide jusqu'à son installation au champ; transportez l'instrument au champ dans un seau rempli d'eau.
3. Repérez un ou plusieurs sites représentatifs dans votre champ.
4. À l'aide d'une sonde pédologique, créer un petit trou d'accès, à peine plus large que le tensiomètre, jusqu'à la profondeur souhaitée.
5. Remplissez le trou d'accès avec de la boue préparée avec de la terre et de l'eau.
6. Placez le tensiomètre dans le trou qui aura été rempli de boue pour assurer un bon contact entre l'embout de céramique et le sol.
7. Remplacez la terre autour du tensiomètre.
8. Remplissez le tensiomètre d'eau et, au moyen d'une pompe à vide, amorcez la jauge à 0,80 – 0,85 bar.
9. Vérifiez périodiquement le niveau d'eau dans le tensiomètre; remplissez-le au besoin et répétez l'étape 8.
10. Déterminez l'eau disponible pour les plantes en convertissant les lectures de potentiel hydrique du sol (Figure 17).
11. L'humidité du sol est-elle inférieure au dessèchement maximal permis?
 - a. Si Oui, allez à l'étape 12.
 - b. Si non, revenez dans quelques jours pour prendre une nouvelle lecture de la jauge.
12. Calculez la profondeur d'irrigation en fonction de la lecture du tensiomètre (Exemple 9 de l'annexe D, page 87).
13. Irriguez au besoin.



Figure 16. Les tensiomètres mesurent la tension du sol, laquelle peut être traduite en teneur en humidité du sol

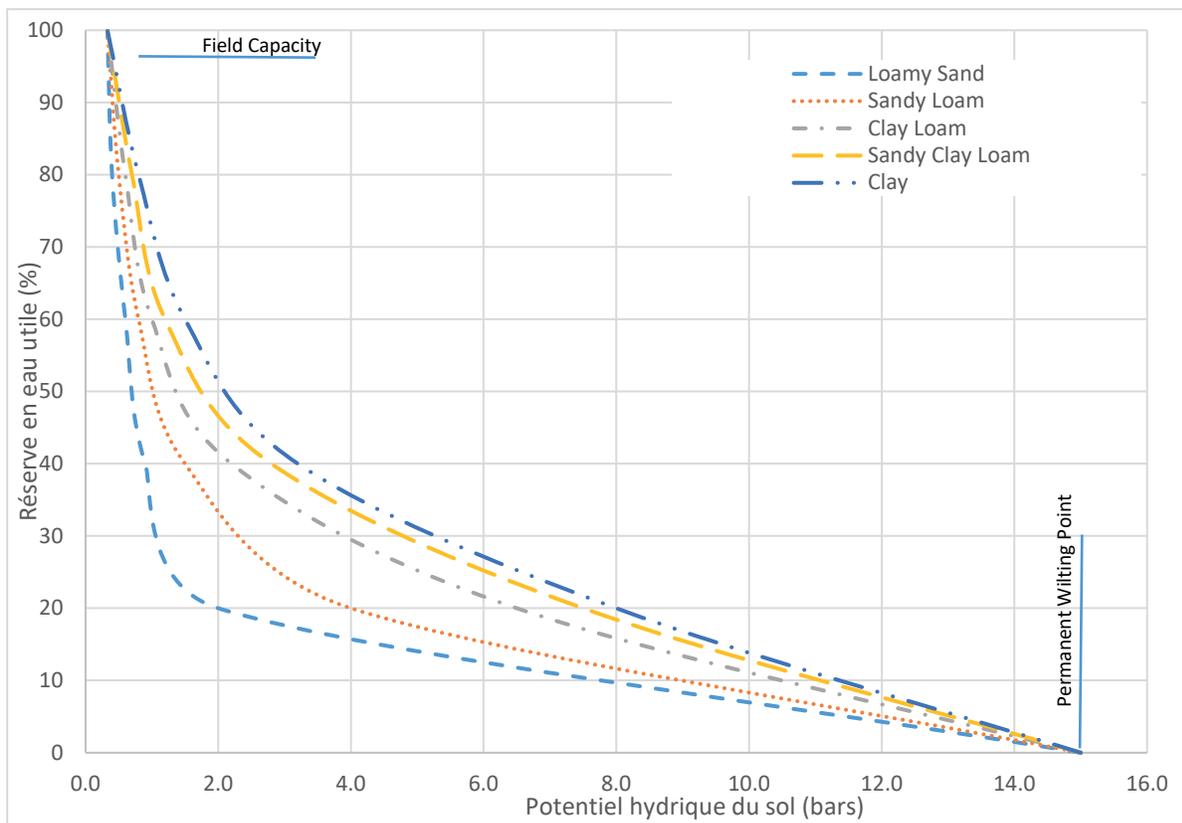


Figure 17. Relation entre la réserve en eau utile (%) et la force de succion ou potentiel hydrique du sol (en bars) nécessaire pour que les plantes puissent avoir accès à l'eau, pour diverses textures de

Pédohygromètres : blocs de gypse et blocs à matrice granulaire

Les pédohygromètres sont constitués d'électrodes intégrées dans un bloc poreux (p. ex., gypse ou céramique) ou une matrice granulaire (Figure 18). Le bloc est trempé dans l'eau avant d'être inséré dans le sol. Après une courte période, la teneur en eau dans le bloc deviendra égale à celle du sol. On peut alors appliquer un courant électrique aux fils conducteurs pour mesurer la résistance. La résistance observée est inversement proportionnelle à l'humidité du sol. En d'autres termes, à mesure que la teneur en humidité diminue, la résistance augmente (résistance élevée = sol sec) et à mesure que la teneur en humidité augmente, la résistance diminue (résistance faible = sol humide). Les fabricants de capteurs proposent des lecteurs qui affichent la tension de l'humidité du sol ou la teneur en humidité équivalente du sol.

AVANTAGES : méthode peu coûteuse; imite l'environnement de la zone racinaire; installation facile.

Méthode : Pédohygromètre

1. Les pédogygromètres nécessitent une période de préconditionnement avant l'installation :
 - a. Faites tremper les pédohygromètres dans de l'eau pendant 30 minutes, puis laissez-les sécher à l'air libre pendant 24 heures.
 - b. Répétez plusieurs fois (au moins trois cycles).
2. Saturer les pédohygromètre tout juste avant leur installation : transportez-les au champ dans un seau rempli d'eau.
3. Repérez un ou plusieurs sites représentatifs dans votre champ.
4. Au moyen d'une sonde pédologique ou d'une pelle, creusez une petite fosse ou un trou d'accès aux profondeurs de mesure souhaitées (par tranches de 15–30 centimètres / 6–12 pouces).
5. Remplissez le trou d'accès avec de la boue préparée avec de la terre et de l'eau.
6. Placez le pédohygromètre dans le trou qui a été rempli de boue pour assurer un bon contact entre l'instrument et le sol.
7. Si vous installez des pédohygromètres à plusieurs profondeurs dans un même trou, remplacez le sol par couches, en compactant chacune d'elles selon les conditions du terrain.
8. Connectez les fils à l'émetteur (lectures automatiques). Si vous utilisez plutôt un appareil de mesure portatif (lectures manuelles), protégez les fils.
9. Marquez l'emplacement du site avec un fanion pour le rendre visible et prévenir les risques d'endommagement par l'équipement agricole.
10. Déterminez la réserve en eau utile en convertissant les lectures de potentiel hydrique du sol (Figure 17).
 - a. REMARQUE : certains lecteurs convertissent automatiquement la lecture en humidité volumique ou eau disponible.
11. L'humidité du sol est-elle inférieure au dessèchement maximal permis?
 - a. Si Oui, allez à l'étape 12.
 - b. Si Non, échantillonnez à nouveau dans quelques jours.

12. Calculez la profondeur d'irrigation en fonction des lectures (Exemple 9 de l'annexe D, page 87).

13. Irriguez au besoin.



Figure 18. Exemple d'un bloc à matrice granulaire (à gauche) attaché à un tube d'accès en

Réflectométrie temporelle

Les sondes de réflectométrie temporelle (TDR) sont précises et fiables, et peuvent aussi servir à mesurer la conductivité électrique du sol (elles sont utilisées pour surveiller les niveaux de salinité du sol).

Les sondes TDR comprennent généralement deux ou trois tiges métalliques reliées à une source de signal ou d'alimentation (Figure 19). Le temps que met un signal électrique pour se déplacer jusqu'à l'extrémité des tiges et en revenir (réflexion) dépend de la teneur en humidité du sol; plus le temps de trajet du signal est long, plus le sol est sec, et vice versa. Les sondes TDR rapportent l'humidité du sol en pourcentage d'humidité volumique. Pour interpréter les lectures, l'irrigant doit connaître la texture du sol pour déterminer la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. Les sondes TDR se vendent en différentes longueurs pour la mesure de l'humidité du sol à différentes profondeurs. En outre, certaines sondes TDR ont une capacité de transmission sans fil intégrée permettant à l'irrigant de visualiser les données d'humidité du sol sur son appareil mobile ou son équipement de bureau, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, et d'observer les tendances au fil du temps.

AVANTAGES : méthode précise; facile à mettre à niveau pour la télésurveillance.

INCONVÉNIENTS : installation perturbant le sol, ce qui peut influencer sur la précision; méthode

Méthode : Réflectométrie temporelle

1. Repérez un ou plusieurs sites représentatifs dans votre champ.
2. Creusez une fosse étroite (installation horizontale) ou un avant-trou (installation verticale) dans le sol à une profondeur tout juste inférieure à la profondeur de détection la plus profonde souhaitée.

3. Insérez les sondes dans le profil aux profondeurs souhaitées (à l'aide d'un maillet en caoutchouc au besoin); assurez-vous que les dents sont droites et parallèles.
4. Remplacez le sol par couches, en compactant chacune d'elles conformément aux conditions du terrain.
5. Marquez l'emplacement du site avec un fanion pour le rendre visible et prévenir les risques d'endommagement par l'équipement agricole.
6. Contrôlez les lectures pour déterminer la réserve en eau utile (Figure 20).
7. L'humidité du sol est-elle inférieure au dessèchement maximal permis?
 - a. Si Oui, allez à l'étape 8.
 - b. Si Non, continuez à surveiller.
8. Calculez la profondeur d'irrigation en fonction des lectures (Exemple 10 de l'annexe D, page 88).
9. Irriguez au besoin.



Figure 19. Exemple de sondes TDR à capacité de transmission de données intégrée (à gauche) qui ont été installées dans un champ irrigué (à droite).

Sonde capacitative

Également appelé réflectométrie dans le domaine fréquentiel (FDR), ce dispositif génère un champ électrique à l'aide d'une source d'énergie et d'un oscillateur. Il mesure les variations d'humidité du sol, comme reflétées par les fluctuations des propriétés diélectriques du sol, directement à proximité de la sonde. Les sondes capacitatives de l'humidité du sol se présentent généralement sous deux formes : de type à plaquette ou de type tubulaire (Figure 21). Le type tubulaire peut être constitué de plusieurs capteurs espacés à des distances prédéfinies (p. ex., 15, 30, 45 centimètres / 6, 12, 18 pouces) dans un boîtier de plastique étanche pour mesurer l'humidité du sol à plusieurs profondeurs à l'aide d'une seule unité. À l'instar des sondes TDR, l'humidité du sol est rapportée en pourcentage d'humidité volumique.

Les sondes capacitatives exigent un bon contact avec le sol pour bien fonctionner. Un mauvais contact avec le sol peut créer des vides ou permettre à l'eau de couler le long de la sonde. Ces deux conditions réduisent le degré de précision des mesures de l'humidité du sol prises par la sonde.

AVANTAGES : système entièrement intégré (sonde et communication); perturbation limitée; mesures prises à de multiples profondeurs.

Méthode : Sonde capacitative tubulaire (pour la sonde à plaquettes, suivez la méthode TDR)

- 1. Repérez un ou plusieurs sites représentatifs dans votre champ.**
- 2. Creusez un avant-trou à l'aide d'une sonde pédologique ou d'une tarière dont le diamètre est égal ou légèrement inférieur à celui de la sonde.**
- 3. Placez la sonde capacitative à la profondeur recommandée par le fabricant.**
- 4. Avec vos mains, remplissez les vides autour de la sonde et à la surface du sol pour compacter le sol.**
- 5. Activez la sonde capacitative (le cas échéant) ou connectez-la au dispositif d'enregistrement.**
- 6. Marquez l'emplacement du site avec un fanion pour prévenir les risques d'endommagement par l'équipement agricole.**
- 7. Contrôlez les lectures pour déterminer la réserve en eau utile (Figure 20).**
- 8. L'humidité du sol est-elle inférieure au dessèchement maximal permis?**
 - a. Si Oui, allez à l'étape 9.**
 - b. Si Non, continuez à surveiller.**
- 9. Calculez la profondeur d'irrigation en fonction des lectures (Exemple 10 de l'annexe D, page 82).**
- 10. Irriguez.**

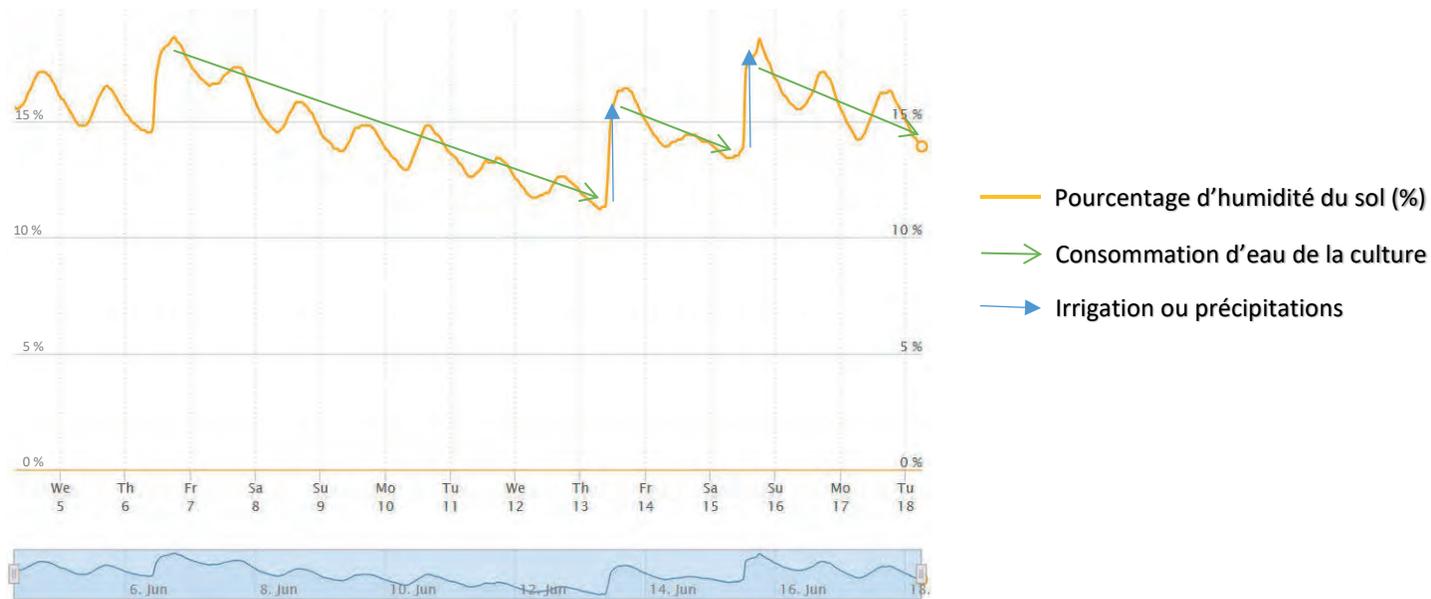


Figure 20. Lectures typiques d'humidité du sol par une sonde TDR ou capacitive pour l'irrigation.



Figure 21. Exemple d'une sonde capacitive tubulaire (à gauche) en train d'être installée dans un champ irrigué (à droite).

Radiomètre à hyperfréquences

Cet appareil (Figure 22 a) mesure les émissions naturelles de micro-ondes du profil de sol à une fréquence spécifique. On peut estimer l'humidité du sol en combinant les lectures de micro-ondes et des informations additionnelles comme la texture du sol et le stade phénologique d'une culture.

Comme le traitement de ces données est complexe, ce type de capteurs exige généralement un abonnement à un service de traitement de données. Un fournisseur de services utilise des données traitées pour générer des cartes d'humidité du sol (figure 22 b) qui révèlent les parties du champ qui ont besoin d'eau. On détermine la profondeur d'irrigation de manière semblable aux autres méthodes basées sur le sol, selon les unités de la carte ou les données du capteur. Étant donné que ces systèmes reposent sur des modèles et utilisent une technologie relativement nouvelle, il est de bonne pratique

d'installer une sonde d'humidité du sol ou de prélever périodiquement des échantillons de sol pour analyser la teneur en eau afin de confirmer les lectures.

AVANTAGES : information spatiale; aucun contact requis; mesures possibles à tous les stades phénologiques d'une culture.

INCONVÉNIENTS : nouvelle technologie de programmation de l'irrigation, un fournisseur de

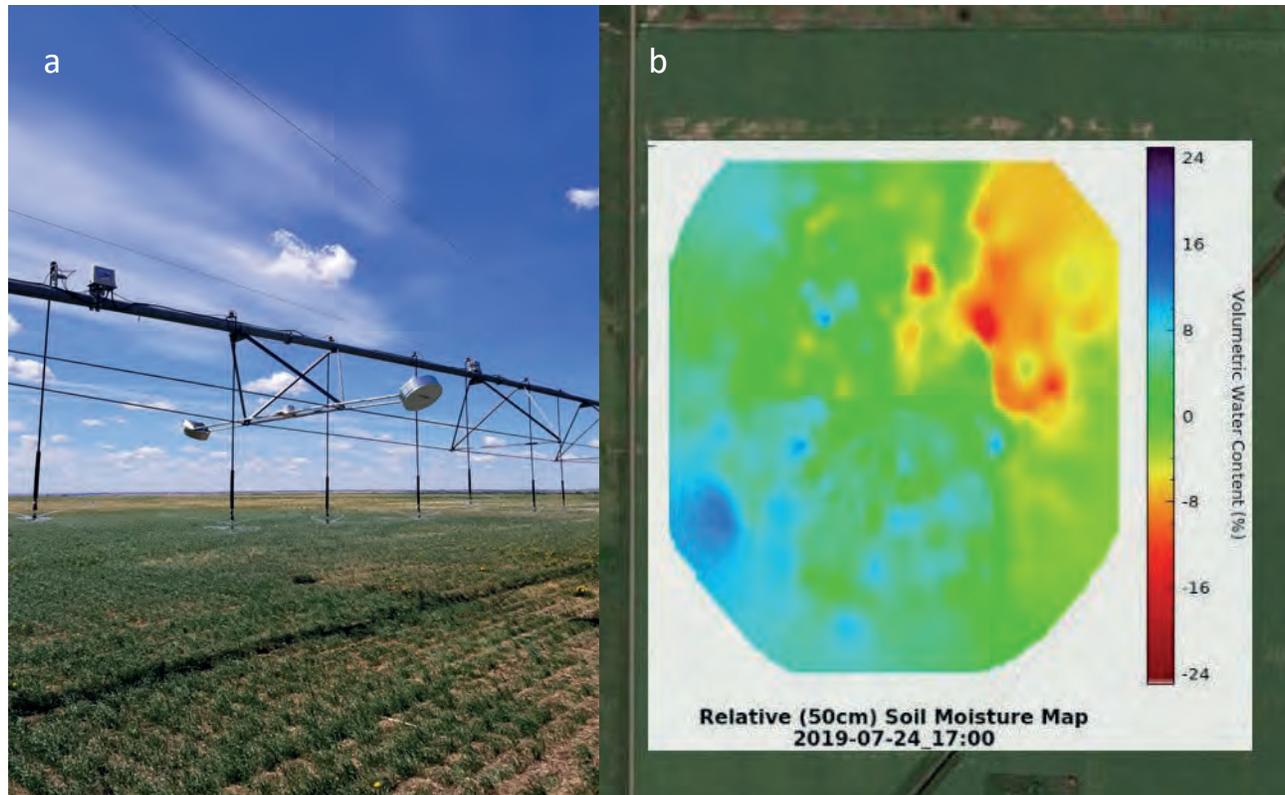


Figure 22. (a) Radiomètre à hyperfréquences monté sur pivot et (b) exemple de carte d'humidité du sol.

Sonde à neutrons

Une sonde à neutrons (figure 23) est un instrument sophistiqué utilisé pour mesurer la teneur en humidité du sol d'une manière non destructive. Son fonctionnement repose sur le principe selon lequel les atomes d'hydrogène, principalement présents dans l'eau du sol, peuvent influencer le comportement des neutrons. La sonde est constituée d'une source radioactive qui émet des neutrons rapides dans le sol. En entrant en collision avec les noyaux des atomes d'hydrogène du sol, ces neutrons perdent de l'énergie. En mesurant le nombre de neutrons lents qui reviennent vers la sonde, l'instrument peut évaluer indirectement la quantité d'hydrogène présente, laquelle est corrélée avec la teneur en humidité du sol. Le détecteur de la sonde capture ces neutrons qui reviennent, et les données sont ensuite traitées pour calculer l'humidité volumique du sol. Cette méthode offre un moyen précis et efficace de contrôler les niveaux d'humidité du sol à différentes profondeurs, ce qui facilite les études agricoles et environnementales, la gestion de l'irrigation et la planification des ressources en eau.

Méthode : Sonde à neutrons

1. Repérez un ou plusieurs sites représentatifs dans votre champ.
2. Percez un petit trou pour l'installation d'un tube d'accès, généralement fait d'un tuyau d'aluminium à parois minces et d'un diamètre de 5 cm (2 po), juste assez grand pour que la sonde s'y insère parfaitement.
3. Installez le tube d'accès à la profondeur maximale que la zone racinaire des cultures semées devrait atteindre, en laissant dépasser le tube de 15 à 30 cm (6–12 po) au-dessus du sol.
4. Avec vos mains, remplissez les vides autour de la sonde et à la surface du sol pour compacter le sol.
5. Placez le lecteur à neutrons sur le tube d'accès, abaissez la source de neutrons dans le tube d'accès à la profondeur souhaitée.
6. Suivez les instructions du fabricant pour la prise de lectures et l'enregistrement de l'humidité volumique.
7. Couvrez le tube d'accès, par exemple avec un bouchon, lorsqu'il n'est pas utilisé afin d'empêcher l'eau et les débris d'y pénétrer.
8. Marquez l'emplacement du site avec un fanion pour prévenir les risques d'endommagement par l'équipement agricole.
9. Prenez périodiquement des lectures à la profondeur d'enracinement, en suivant les recommandations du fabricant.
10. L'humidité du sol est-elle inférieure au dessèchement maximal permis?
 - a. Si Oui, allez à l'étape 11.
 - b. Si Non, continuez à surveiller.
11. Calculez la profondeur d'irrigation en fonction des lectures.
12. Irriguez.

AVANTAGES : lectures non destructives et précises de l'humidité volumique

INCONVÉNIENTS : source radioactive (licence et formation nécessaires), visites sur le terrain nécessaires pour les lectures.



Figure 23 : Capteur d'humidité du sol à sonde neutronique (L. Hingley, gouvernement de l'Alberta)

Programmation de l'irrigation basée sur la météo

La programmation de l'irrigation basée sur la météo calcule les changements d'humidité du sol en prenant en compte les données météorologiques locales et l'évapotranspiration estimée. Le ruissellement et le drainage sont d'autres facteurs potentiels, mais dans un système agricole bien géré, ces facteurs devraient être négligeables et on simplifie les calculs en supposant que ces facteurs contribuent peu aux changements d'humidité du sol (Équation 3 de l'annexe C, page 79).

Bilan hydrique

Le bilan hydrique (méthode du chéquier) est un exemple de méthode de comptabilisation de l'eau qui prend en compte les entrées et les sorties d'eau. Tout comme l'utilisation d'un chéquier pour le suivi de ses finances personnelles, la méthode du bilan hydrique permet de suivre les dépôts ou apports d'eau (irrigation et précipitations = crédits) et les retraits ou prélèvements d'eau (évaporation et consommation d'eau par les cultures = débits).

Le bilan hydrique est une façon simple d'estimer la réserve en eau utile. La plus grande source d'erreur est la variable de l'évapotranspiration. Les estimations d'évapotranspiration sont généralement peu fiables, car elles sont basées sur le stade phénologique de la culture et sont rapportées mensuellement (contrairement aux données météorologiques qui sont rapportées quotidiennement) (Tableau A7 de l'annexe A, page 74). Une pratique exemplaire qui est recommandée consiste à prélever périodiquement des échantillons de sol ou à utiliser des capteurs d'humidité du sol pour corriger les mauvaises estimations d'évapotranspiration (Exemple 11 de l'annexe D, page 89).

Évapotranspiration

L'évapotranspiration varie selon la culture, la variété cultivée, le stade phénologique, l'état de la culture, la conduite culturale et les conditions météorologiques. Le taux moyen d'évapotranspiration quotidienne augmente à mesure que la culture arrive à maturité et l'utilisation quotidienne maximale a lieu pendant les périodes critiques comme la floraison et le développement initial des fruits, des gousses ou des graines (Tableau A7 de l'annexe A, page 74).

L'évapotranspiration est difficile à mesurer directement, mais elle peut être estimée avec précision à l'aide de modèles comme l'équation de Penman-Monteith de la FAO (Équation 4 de l'annexe C, page 80). L'évapotranspiration est d'abord calculée pour une culture de référence (p. ex. une graminée ou de la luzerne) avec des données météorologiques locales (Figure 24). Comme la consommation d'eau est variable d'une culture à l'autre, le taux d'évapotranspiration de référence est ajusté avec un coefficient spécifique à la culture (Équation 5 de l'annexe C, page 80). En outre, la consommation d'eau de la culture varie selon son stade phénologique (Figure 25). Pour la prise en compte ces facteurs, l'évapotranspiration de référence est affinée avec des coefficients spécifiques à la culture et à son stade phénologique (Tableau A8 de l'annexe A, page 75).

Le calcul du taux d'évapotranspiration est complexe et nécessite des données environnementales détaillées qui ne sont peut-être pas disponibles pour votre région. Pour pallier cette limitation, certains gouvernements provinciaux ont développé des logiciels de programmation de l'irrigation ou des applications en ligne qui sont capables d'effectuer ces calculs à partir de données minimales fournies par l'irrigant. Les calculateurs de programmation de l'irrigation couramment utilisés dans l'Ouest canadien sont l'Alberta Irrigation Management Model (AIMM) (Figure 26) et le BC Agricultural Irrigation Scheduling Calculator (BCAISC).

L'AIMM utilise les données météorologiques d'Environnement et Changement Climatique Canada provenant de stations situées dans les districts d'irrigation de l'Alberta ainsi que d'Outlook (Sask.), tandis que le BCAISC s'appuie sur les données d'un réseau de stations météorologiques soutenu par www.farmwest.com, lequel couvre la plus grande partie de la superficie agricole du Canada. Les utilisateurs peuvent commencer par sélectionner la station météorologique la plus proche de leur ferme, puis saisir des informations sur le sol et les pratiques culturales afin de recevoir des prévisions sur la teneur en humidité du sol et des recommandations sur le moment approprié des arrosages et des quantités d'eau à apporter. Le logiciel gratuit, la documentation et le matériel de formation pour l'AIMM sont disponibles en ligne à <https://agriculture.alberta.ca/acis/imcin/aimm.jsp>, tandis que le BCAISC est disponible en ligne à <https://ag-calc.irrigationbc.com/>. Pour obtenir de plus amples renseignements ou de l'aide sur l'utilisation de l'un ou l'autre de ces services, veuillez contacter le bureau des services de vulgarisation et d'aide aux irrigants de votre province (voir Aide offerte pour la programmation de l'irrigation, page 69).

AVANTAGES : méthode peu coûteuse; visuelle; possibilité de recevoir des alertes.

INCONVÉNIENTS : exige une formation et l'apport de corrections périodiques.

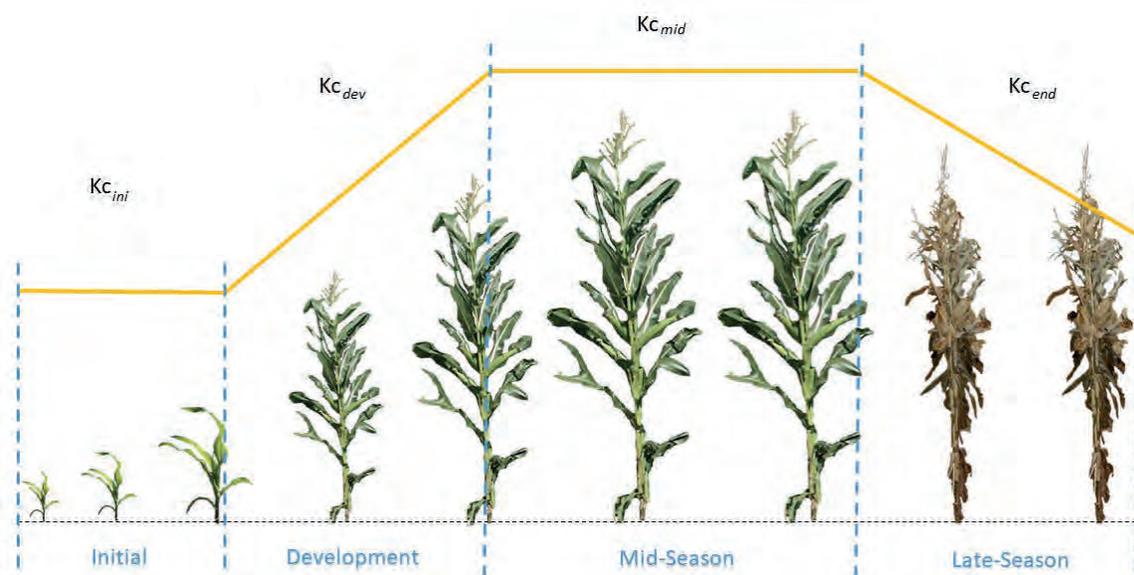


Figure 25. Représentation des coefficients de consommation d'eau d'une culture de maïs à

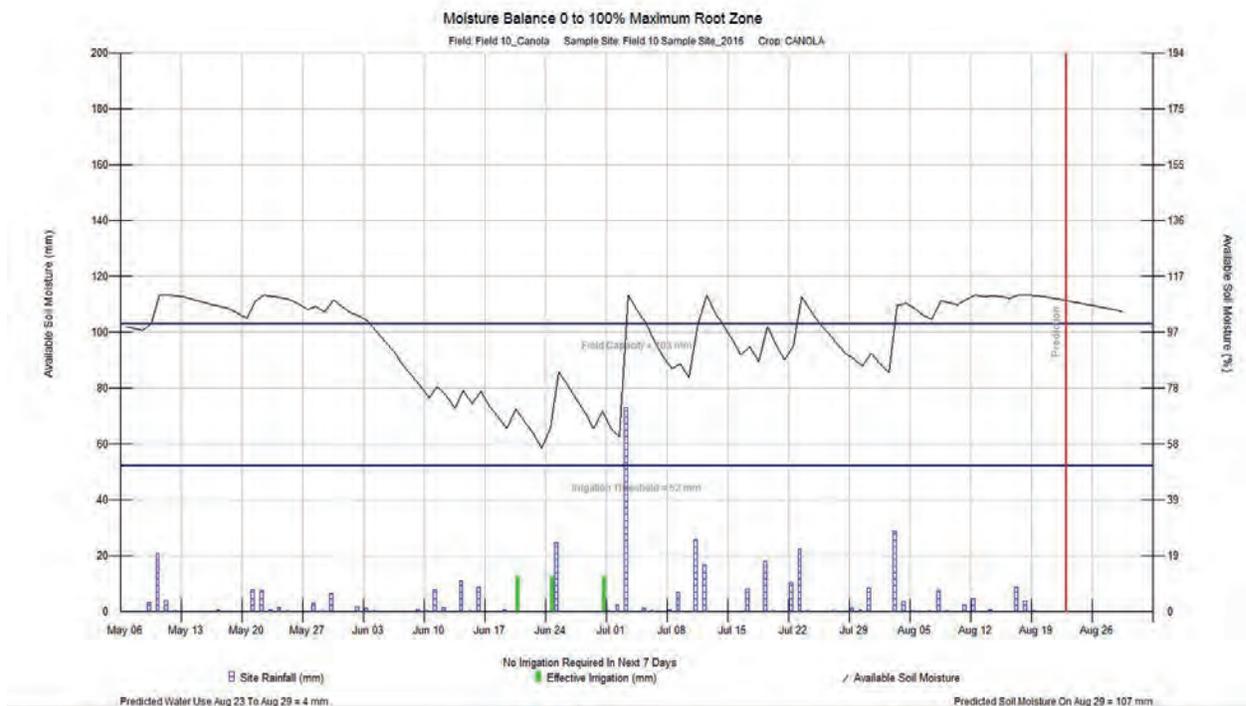


Figure 26. Exemple d'un graphique généré par le programme AIMM de l'Alberta, un outil de gestion

Programmation de l'irrigation basée sur les besoins des plantes

Les méthodes de programmation de l'irrigation basées sur les besoins des plantes mesurent l'état de la culture (p. ex., le degré de stress des plantes) pour décider quand déclencher ou programmer les arrosages. Cependant, sans plus d'information, ces méthodes ne peuvent qu'indiquer quand et où la culture a besoin d'eau, mais pas les quantités à apporter. Un programme d'irrigation simple basé sur une seule culture, établi pour une profondeur fixe, consiste à appliquer une quantité fixe d'eau (p. ex., 0,5 pouce) chaque fois que la culture montre des signes de stress. Un programme d'irrigation plus complexe associe des modèles météorologiques aux mesures de stress des plantes pour estimer les besoins d'irrigation.

Deux indicateurs de l'état hydrique des plantes qui sont couramment utilisés en programmation de l'irrigation sont l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et la température du couvert végétal.

Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

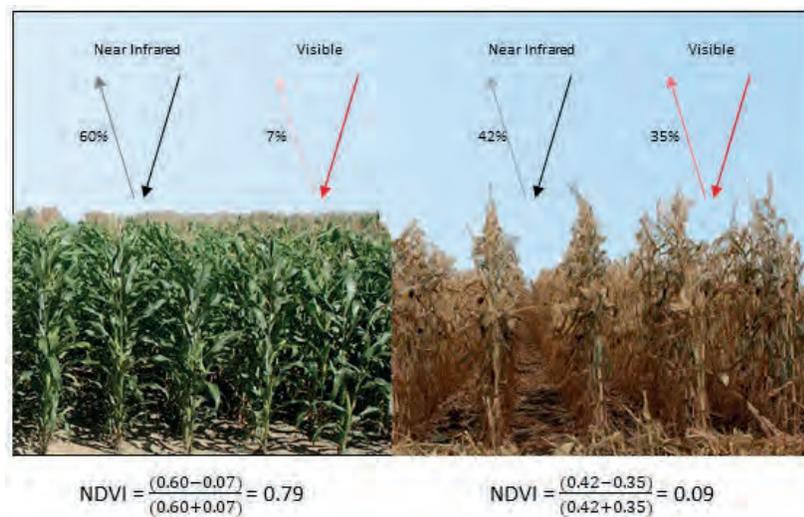
La lumière du soleil est composée de plusieurs longueurs d'onde. Lorsque la lumière du soleil touche une feuille, une partie des longueurs d'onde de la lumière visible est absorbée et utilisée pour la photosynthèse (principalement le rouge, le bleu et dans une moindre mesure, le vert), tandis que les autres longueurs d'onde sont réfléchies (p. ex., lumière proche infrarouge invisible). Cela signifie que plus le couvert est dense et plus la culture est saine, plus la lumière visible est absorbée et plus la lumière proche infrarouge est réfléchi (Figure 27). Des satellites ou des véhicules aériens sans pilote (drones) peuvent être utilisés pour mesurer à l'échelle du champ ces caractéristiques de la lumière.

Les données captées par télédétection sont utilisées pour calculer l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) — une valeur qui établit une relation entre la croissance végétale et le ratio de la

lumière réfléchi (proche infrarouge) sur la lumière absorbée (rouge) (Équation 6 de l'annexe C). L'indice peut varier entre -1 et 1, mais dans la pratique, il se situe entre 0 (sol nu) et 1 (couvert végétal sain et dense). À partir de cette relation simple, les irrigants peuvent rapidement avoir une idée de la santé de la culture et de la densité du couvert végétal à l'aide d'images acquises par télédétection.

L'emploi de l'indice NDVI est une approche de programmation de l'irrigation qui est réactive, plutôt que proactive ou prédictive, car les besoins d'eau sont estimés à partir de l'indice NDVI du couvert végétal pris au moment de sa mesure. Même si l'adaptation de l'irrigation aux besoins de la culture améliore l'efficacité d'utilisation de l'eau, une fois que l'on peut observer un stress hydrique sur des images d'indice NDVI, le rendement est peut-être déjà réduit et difficile à récupérer (Bauer 2019). Pour contrer cette limitation, les producteurs peuvent utiliser des images historiques d'indices NDVI pour déterminer les zones vulnérables au stress hydrique en ajustant les programmes d'irrigation pour non seulement remédier aux déficits hydriques, mais aussi améliorer potentiellement les rendements.

Une autre limitation est celle de la dépendance aux satellites pour capter les données de réflectance. Les satellites ne sont pas toujours bien positionnés (directement au-dessus d'un lieu donné) et la fréquence de leur retour varie de quotidienne à hebdomadaire selon la source. En outre, la couverture nuageuse peut influencer considérablement sur la précision des lectures. Des drones ou d'autres technologies terrestres peuvent être utilisés pour collecter les données de réflectance lumineuse afin de compléter ou de combler les lacunes de la couverture satellitaire.



AVANTAGES : mesures spatiales; entrées minimales; surveillance par télédétection.
INCONVÉNIENTS : la collecte des images est entravée par la couverture nuageuse; exige des

Irrican : outil de programmation de l'irrigation basé sur l'indice NDVI qui est disponible en ligne

Combinant des données d'imagerie satellitaire avec des modèles météorologiques classiques, Irrican (www.irrican.com) est un outil de programmation de l'irrigation opérant avec des instruments de mesure spatiaux qui a été adapté pour les irrigants canadiens à partir de l'outil Irrisat, lequel a été mis au point en Australie (<https://irrisat-cloud.appspot.com/>). Irrican importe automatiquement les données de Google Earth (images satellites, données d'indices NDVI, cartes) et les flux de données météorologiques locales. L'application tient compte de la relation linéaire entre l'indice NDVI et la consommation d'eau de la culture : un champ où pousse une culture dense et saine (indice NDVI plus élevé) consomme plus l'eau qu'une culture moins dense et moins saine (indice NDVI plus faible) (Équation 7 de l'annexe C, page 80). Cette relation reste vraie quelle que soit la culture et elle sert de base au calcul de l'évapotranspiration pour estimer la consommation d'eau de la culture. La combinaison de l'indice NDVI avec les estimations météorologiques de la consommation d'eau de la culture permet d'approfondir et de caractériser la variation des besoins hydriques dans l'ensemble du champ (Figure 28), ce qui permet de mieux programmer l'irrigation. Pour obtenir de l'aide sur l'utilisation d'Irrican, veuillez contacter le bureau des services de vulgarisation des méthodes d'irrigation de votre province (voir la section Aide offerte pour la programmation de l'irrigation, page 69).

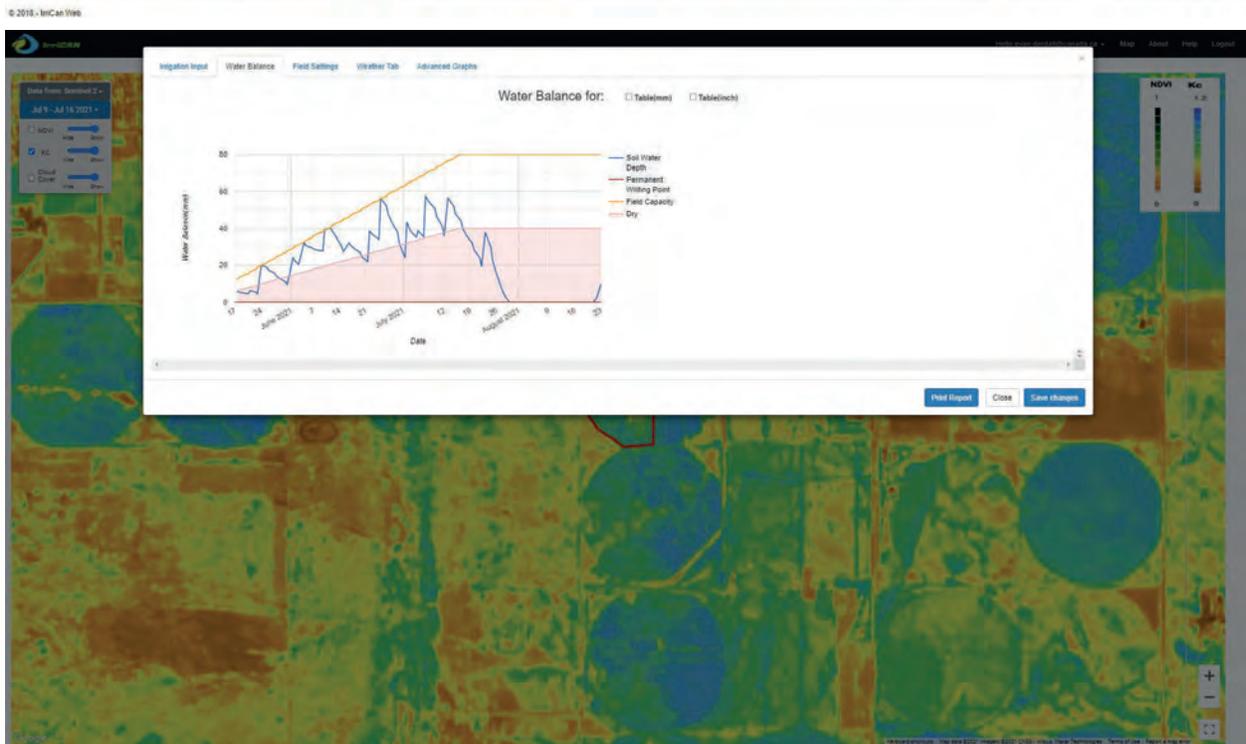
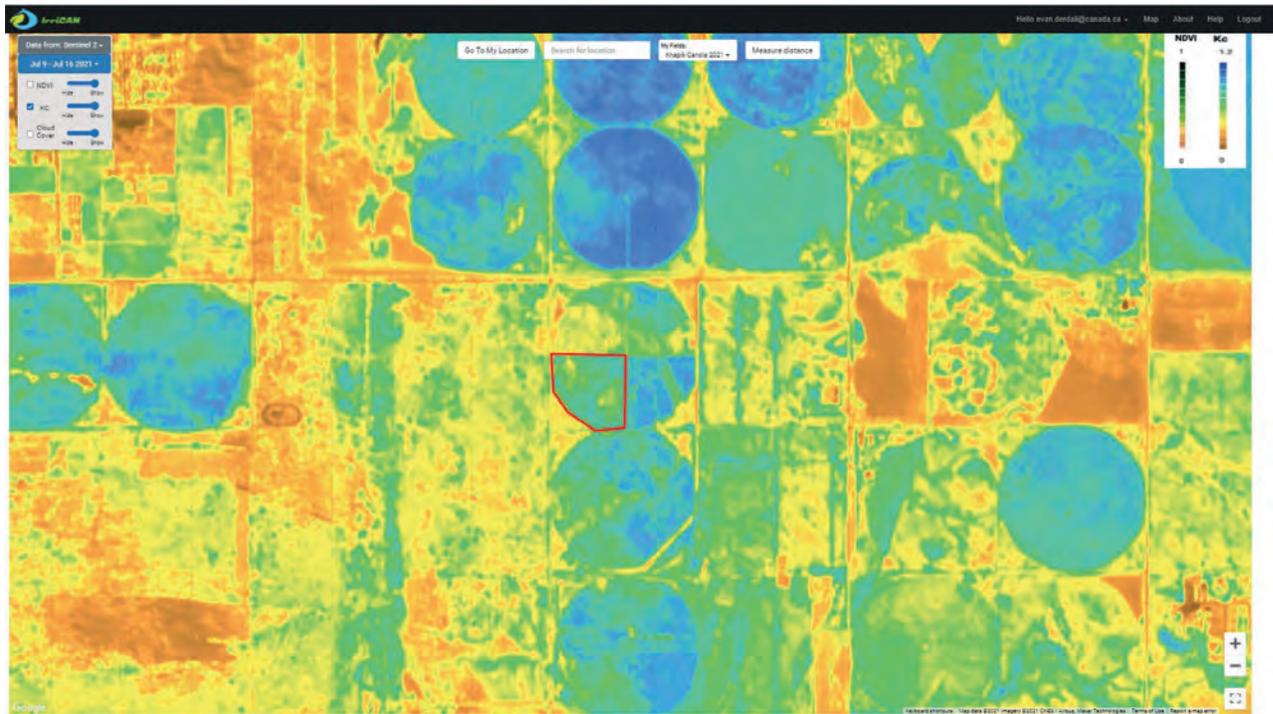


Figure 28. En haut : Page de la carte IrriCAN montrant l'imagerie hebdomadaire de l'indice NDVI. En bas : Bilan hydrique généré pour un champ irrigué. (disponible en anglais seulement)

Température du couvert végétal / indice de stress hydrique de la culture (CWSI)

Pendant la journée, l'effet de refroidissement que procure l'eau transpirée qui s'évapore de la surface d'une feuille maintient la température interne de la feuille proche de la température de l'air. Lorsque l'humidité du sol est insuffisante (déficit hydrique), les feuilles ferment partiellement ou totalement leurs stomates pour réduire ou arrêter les pertes d'eau par transpiration afin de réduire le stress de sécheresse. Malheureusement, cela fait augmenter rapidement la température des feuilles, et un stress thermique aggrave le stress hydrique (déficit d'humidité du sol → réponse à la sécheresse → réchauffement du couvert végétal). La température du couvert végétal de la culture peut être mesurée à l'aide d'un thermomètre infrarouge (Figure 29) afin de déterminer où et quand la température du couvert végétal est supérieure à la température de l'air, appelée la température différentielle (dT).

Remarque : la présence d'insectes nuisibles et de maladies peut également provoquer des hausses de température du couvert végétal. Si le profil des écarts de température semble douteux, notamment dans le cas de la prévalence de zones basses habituellement humides, ou s'il persiste après un arrosage, vous devez inspecter votre culture. Toutes les méthodes de programmation de l'irrigation basées sur les plantes sont sujettes à ces anomalies, ce qui justifie une analyse de la culture pour déterminer la cause du stress observé dans la culture.

Une façon de décrire la relation entre le stress hydrique de la culture et la température du couvert végétal est de calculer l'indice de stress hydrique de la culture (Équation 8 de l'annexe C, page 81) : un indice de 0 signifie que la culture ne subit aucun stress hydrique; plus l'indice est près de 1,0, plus le stress hydrique est important.

L'utilisation de la température du couvert végétal est une approche de programmation de l'irrigation plus réactive que l'utilisation de l'indice NDVI : le stress hydrique est détecté plus tôt et déclenche l'irrigation dès les premiers signes de stress hydrique, limitant ainsi la réduction potentielle de rendement. Cependant, à l'instar de la méthode de programmation de l'irrigation par l'indice NDVI, l'indice de stress hydrique de la culture se limite à conseiller où et quand irriguer, sans pouvoir dire la quantité d'eau à apporter. Des renseignements additionnels (modèles de programmation climatique, mesures du sol, etc.) sont encore nécessaires pour déterminer la quantité d'eau à appliquer.

AVANTAGES : méthode fiable qui fournit une bonne indication précoce du stress des plantes; se prête à des applications spatiales.

INCONVÉNIENTS : ne donne aucune indication sur la profondeur d'irrigation (des mesures

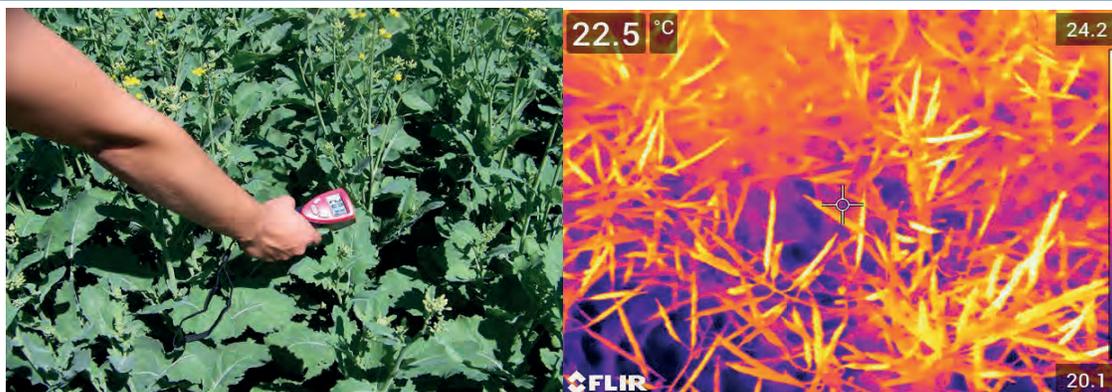
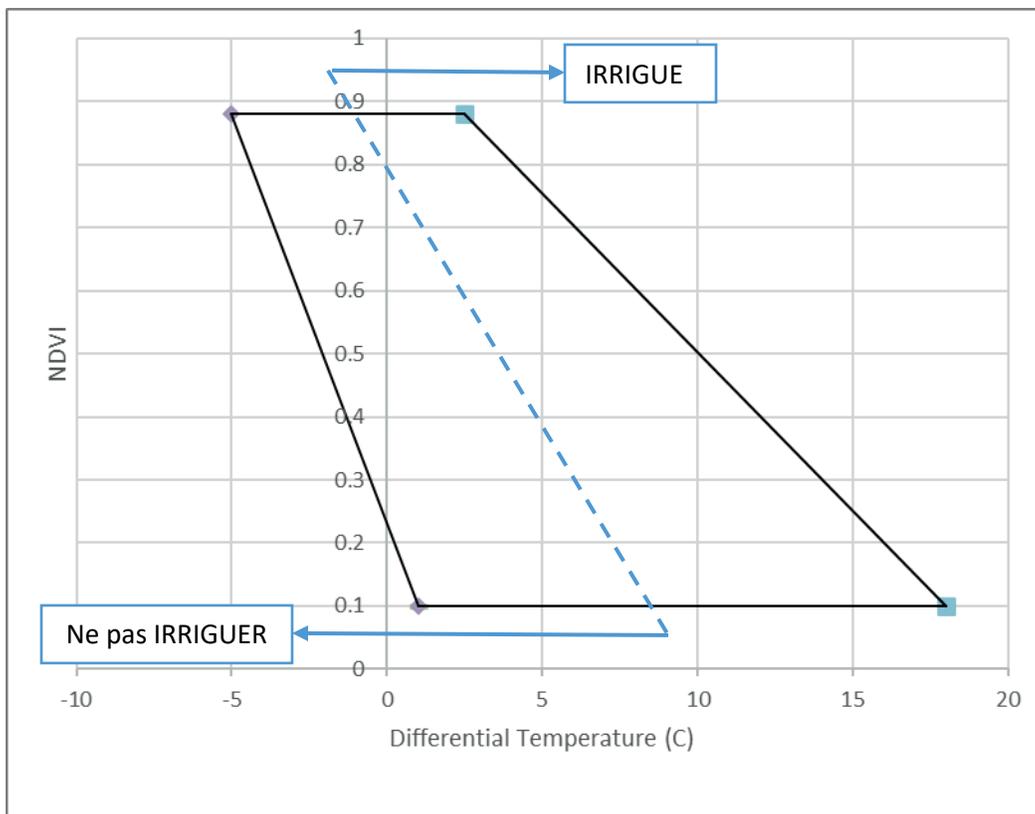


Figure 29. Thermomètre infrarouge portatif (à gauche) et image thermique d'une culture de canola (à droite).

Courbes de NDVI-dT

Une autre méthode basée sur les plantes combine la température différentielle du couvert végétal avec les valeurs NDVI pour orienter la programmation de l'irrigation. Les chercheurs ont tracé des courbes de NDVI-dT, comme celle montrée à la Figure 30 pour un site en Saskatchewan. En utilisant à la fois un thermomètre infrarouge et un capteur NDVI (p. ex. GreenSeeker), les irrigants peuvent prendre des



mesures périodiques et, à l'aide des courbes disponibles, déterminer s'il est nécessaire d'irriguer.

Figure 30. Courbe de NDVI-dT pour le blé irrigué à Outlook (Sask.) (Derdall, 2023)

Méthode : NDVI-dT (les lectures doivent être prises autour de midi solaire (de 12 h à 14 h))

1. Repérez un ou plusieurs sites représentatifs dans votre champ.
2. Obtenez la valeur NDVI du couvert végétal
3. Prenez une lecture de la température du couvert végétal
4. Calculez la température différentielle (température du couvert végétal - température de l'air).
5. Reportez-vous au NDVI-dT (p. ex., Figure 30)
6. Le point de mesure se trouve-t-il sur le côté droit du trapèze?
 - a. Si Oui, allez à l'étape 7.
 - b. Si Non, continuez à surveiller.
7. Faites un arrosage normal en appliquant par exemple de 12,5 à 25 mm d'eau (0,5 - 1,0 po).

Considérations spécifiques aux cultures

La programmation de l'irrigation des cultures doit être adaptée à leurs caractéristiques et besoins particuliers. Les programmes d'irrigation devront être adaptés à la culture (stades phénologiques, profondeur des racines, besoins hydriques), au système d'irrigation (pivot central, goutte-à-goutte) et aux facteurs ambiants (sol, conditions météorologiques). Dans l'Ouest canadien, une attention particulière doit être portée à quelques cultures irriguées en raison des impacts possibles de la gestion des arrosages sur leur qualité et valeur marchande comparativement aux grandes cultures classiques irriguées.

Luzerne

La luzerne est une plante fourragère vivace cultivée extensivement comme source d'alimentation pour le bétail dans la région irriguée des Prairies canadiennes. La luzerne est unique en raison de son cycle de production pérenne, de sa structure d'enracinement profonde et de ses multiples dates de récolte pendant une même saison végétative.

La luzerne est relativement tolérante à la sécheresse en raison de son système d'enracinement profond, mais elle produira une biomasse aérienne importante si elle dispose d'éléments nutritifs en quantité adéquate et si l'humidité du sol est maintenue à un niveau supérieur à 60 %. La luzerne a besoin d'une grande quantité d'humidité, la moyenne saisonnière se situant entre 540 et 680 mm (Alberta Agriculture and Forestry, 2011).

Pendant l'année de son établissement, la luzerne doit être arrosée fréquemment jusqu'à ce que ses racines soient suffisamment développées pour pouvoir retenir des réserves d'eau substantielles. L'établissement de la luzerne exige des apports d'eau importants pour subvenir à ses besoins d'évapotranspiration jusqu'à la première coupe qui a lieu généralement à la mi-août au cours de la première saison. Au moment où la culture entame son hivernation, l'humidité du sol devrait être ramenée à 70 % de sa réserve en eau utile (RU), car toute valeur supérieure à ce chiffre augmente le risque de mortalité hivernale.

Dans les années de production, les besoins hydriques de la luzerne commencent lorsque le sol se réchauffe et que le gel a complètement quitté la zone d'enracinement, qui peut être d'environ 120 cm à ce moment-là. Une fois que la luzerne commence à pousser au printemps, ses besoins hydriques augmentent rapidement et les programmes d'irrigation devraient être élaborés de manière à maintenir l'humidité du sol au-dessus de 60 % de la réserve en eau utile dans les premiers 90 cm de la zone racinaire. Les programmes d'irrigation de la luzerne doivent être adaptés aux calendriers de fauche et de récolte de la luzerne (pressage) (figure 31). Avant le fauchage de la luzerne, il faut que l'humidité du sol soit supérieure à 70 % de la réserve en eau utile afin de lui laisser suffisamment de réserves en eau pour pouvoir la couper et la récolter et lui permettre de survivre jusqu'à la prochaine irrigation après sa récolte. Cette réserve hydrique tampon permettra d'éviter que l'humidité du sol ne descende en-dessous de 60 % de la réserve en eau utile durant la période de coupe.

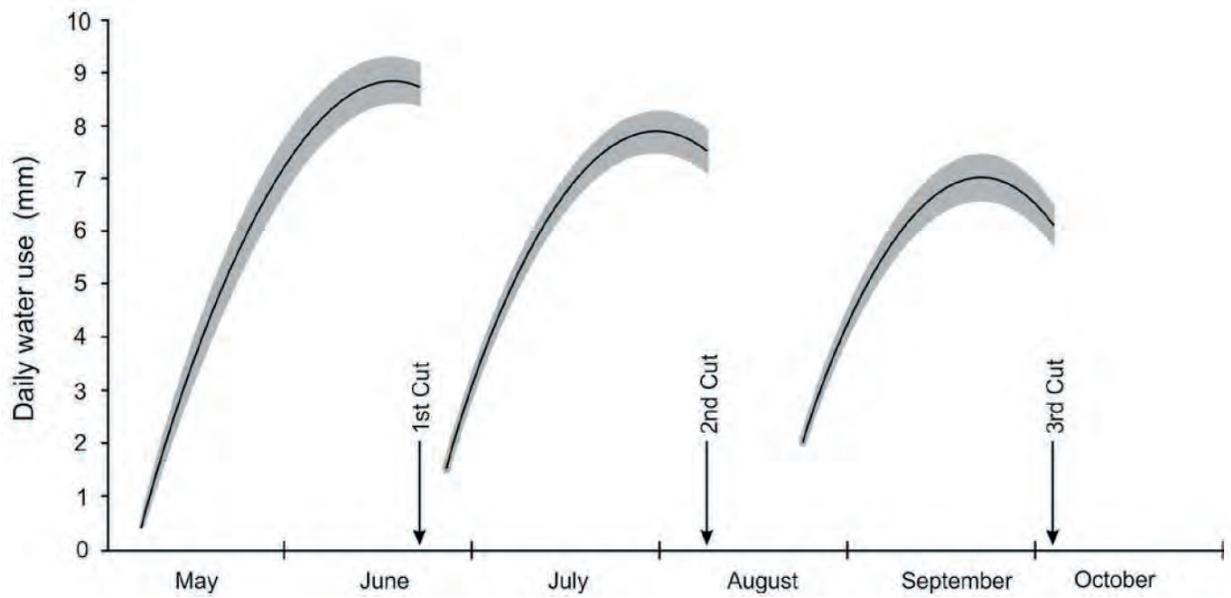


Figure 31 . Consommation quotidienne d'eau pour la première, la deuxième et la troisième coupe de luzerne (Alberta Agriculture, 2011)

Pomme de terre



Crédit photo : M.D. Timmerman, Agriculture Manitoba, 2022

La gestion de l'irrigation des pommes de terre a des exigences particulières comparativement à la majorité des grandes cultures en raison de la faible profondeur d'enracinement de cette culture, de l'impact de l'irrigation sur la qualité des tubercules, de la valeur élevée de cette culture et des coûts de production qui y sont associés. Les pommes de terre ont constamment besoin d'eau à tous leurs stades de développement, mais les quantités d'eau nécessaires varient selon les stades. Il est essentiel de comprendre les stades phénologiques des pommes de terre pour bien programmer leur irrigation (adapté de la fiche technique sur la croissance de la pomme de terre et la programmation de l'irrigation de l'Université de Nebraska-Lincoln, 2023) :

1. Du semis à la prélevée – l'humidité du sol pendant cette période de croissance végétative doit être maintenue au-dessus de 60 % de la réserve utile en eau (RU). L'irrigation doit être modérée pendant cette période, car il est important que le sol soit bien aéré. Si le sol est trop humide (près de la capacité du champ), dans certains environnements, les conditions du sol peuvent favoriser le développement des agents causaux de la pourriture molle, de la jambe noire et du chancre de la tige et du stolon.
2. De l'émergence à l'initiation de la tubérisation – Cette période correspond au début de la croissance rapide des tiges de pommes de terre. L'humidité du sol durant cette période devrait être maintenue entre 70 % et 80 % de la RU. Une humidité du sol inférieure à 60 % de la RU est jugée déficitaire et peut inhiber la croissance des parties aériennes et des racines. Une humidité excessive durant cette période peut entraver la ramification des racines et entraîner un lessivage de l'azote. Au moment où la culture entame le stade de l'initiation de la tubérisation, un stress hydrique peut entraîner la formation de chaînes de tubercules et de stolons induits par la chaleur (Figure 32), ce qui réduit le nombre de tubercules par plant et cause une perte de rendement importante.



Figure 32 . Développement de stolons (à gauche) et de chaînes de tubercules (à droite) induit par un stress hydrique (S. Graham, Simplot, 2022)

3. De l'initiation de la tubérisation à la pleine floraison – l'initiation de la tubérisation marque le début de la période d'arrosage la plus intensive durant la production de pommes de terre. L'humidité optimale du sol se situe entre 70 et 80 % de la RU. Un déficit hydrique durant cette

période augmente considérablement les risques de malformation des tubercules et d'apparition d'un défaut sur les tubercules qui présentent alors des extrémités foncées (appelé « sugar-



ends » en anglais). Ce défaut est causé par une mauvaise répartition des sucres à l'intérieur des tubercules (Figure 33). Un déficit hydrique durant ce stade cause une perte de qualité. Comme le stress hydrique affaiblit également les plantes, il cause des baisses de rendement et rend les plantes plus vulnérables à l'alternariose et à la gale commune. Un excès d'eau ou une eau stagnante peut favoriser le développement du cœur brun, et chez les gros tubercules, la formation d'un cœur creux.

Figure 33 : Décoloration des frites causée par une teneur en sucre inadéquate aux extrémités des tubercules (à gauche - 0 %, à droite 20 %) qui justifie une réduction de prix du produit (S. Graham, Simplot, 2022).

4. Grossissement des tubercules – les tubercules se développent rapidement et exigent de grandes quantités d'eau pour continuer leur croissance. L'humidité du sol doit continuer à être maintenue entre 70 et 80 % de la RU, le stade du grossissement des tubercules étant le plus sensible au déficit hydrique. Une humidité insuffisante peut rendre la plante vulnérable à des malformations des tubercules, à la sénescence précoce des plants, à l'alternariose, à la tache brune et à la gale commune. En revanche, l'excès d'humidité peut accroître le cœur creux, l'élargissement des lenticelles, la jambe noire, le mildiou et la vulnérabilité à la pourriture.

5. Maturité - c'est la période caractérisée par la sénescence des tiges et des feuilles. Lorsque les tiges meurent, la peau des tubercules s'endurcit et adhère au tubercule et à sa chair. Il faut réduire l'irrigation pendant cette période pour permettre aux pommes de terre de mûrir, et l'humidité du sol doit être maintenue entre 60 et 65 % de la RU. Si l'humidité du champ descend en-dessous de 50–55 % de la RU, il faut irriguer en fin de saison pour augmenter l'humidité à 60 % de la RU afin de réhydrater les tubercules et d'assouplir le sol pour faciliter la récolte. La production de pommes de terre exige une surveillance étroite de l'humidité du sol afin de prévenir les impacts d'un déficit ou d'un excès d'humidité sur le rendement et la qualité des tubercules. Comme la production de pommes de terre est associée à des coûts d'intrants élevés, il est important d'élaborer un programme d'irrigation approprié pour protéger votre investissement.



Source : S. Graham, Simplot 2022

PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION GOUTTE-À-GOUTTE ET DE LA MICRO-IRRIGATION

L'irrigation goutte-à-goutte et la micro-irrigation réfèrent aux systèmes d'irrigation qui distribuent lentement de l'eau au niveau de la zone racinaire des plantes ou près de celle-ci. Cette méthode implique généralement l'installation de tubes en polyéthylène au-dessus ou au-dessous de la surface du sol, près des racines des cultures, afin de maximiser l'efficacité du système d'alimentation en eau.



a. Micro-asperseurs. Des goutteurs à faible débit ou des micro-asperseurs sont montés au-dessus de la surface du sol. La surface est mouillée à chaque arrosage



b. Goutte-à-goutte en surface. Les lignes et les goutteurs passifs sont placés à la surface du sol ou recouverts d'une couche de terre de moins de 5 cm d'épaisseur. La surface est mouillée à chaque arrosage.



c. Goutte-à-goutte souterrain. Les lignes et les goutteurs passifs sont placés sous la surface du sol (20 à 40 cm de profondeur). La surface n'est mouillée qu'après de longs arrosages.

Figure 34. Terminologie de l'irrigation goutte-à-goutte et de la micro-irrigation (Source : USDA (a et b), Southern Irrigation (c))

L'irrigation goutte-à-goutte et la micro-irrigation sont depuis longtemps utilisées dans les cultures horticoles de valeur élevée et les cultures de vivaces en rangées en raison du coût de ce type de système. Toutefois, en raison de sa grande efficacité d'utilisation de l'eau et des besoins réduits de pompage, l'irrigation goutte-à-goutte sous la surface commence à être plus populaire dans les grandes cultures classiques. Les systèmes d'irrigation goutte-à-goutte permettent d'économiser l'eau et d'augmenter le rendement des cultures en cas de restrictions d'eau. Les systèmes d'irrigation goutte-à-goutte se caractérisent par de faibles débits.

Composants d'un système d'irrigation goutte-à-goutte

Les principaux composants d'un système d'irrigation goutte-à-goutte sont semblables à ceux d'un système à pivot central. La principale différence réside dans le fait que le système d'approvisionnement en eau lui-même est installé de manière permanente sur toute la superficie d'un champ. Les composants sont :

1. Pompe
2. Filtres - empêchent les débris et les sédiments d'obstruer les goutteurs, assurant ainsi un débit d'eau constant.

3. Vannes et régulateurs de pression - ils maintiennent une pression constante dans le système, assurant une distribution uniforme de l'eau.
4. Panneau de commande - permet de configurer des programmes d'irrigation réguliers, d'irrigation de retour ou d'applications de fertigation, et de télécharger des informations sur les systèmes précédents. Il est le plus souvent relié à un dispositif de communication à distance qui permet de concevoir des programmes sur un ordinateur ou un téléphone.
5. Tubes et rampes latérales - Ils acheminent l'eau de la source d'eau aux goutteurs. Les lignes principales acheminent l'eau jusqu'au champ et les lignes secondaires ou rampes latérales distribuent l'eau à l'intérieur du champ.
6. Goutteurs - Ce sont les dispositifs qui libèrent l'eau goutte à goutte directement dans la zone racinaire de la plante.
7. Zones - ensembles de blocs latéraux qui sont irrigués simultanément. Les besoins de pompage d'un système d'irrigation goutte-à-goutte peuvent être maintenus bas en n'irriguant pas tout le champ en même temps.

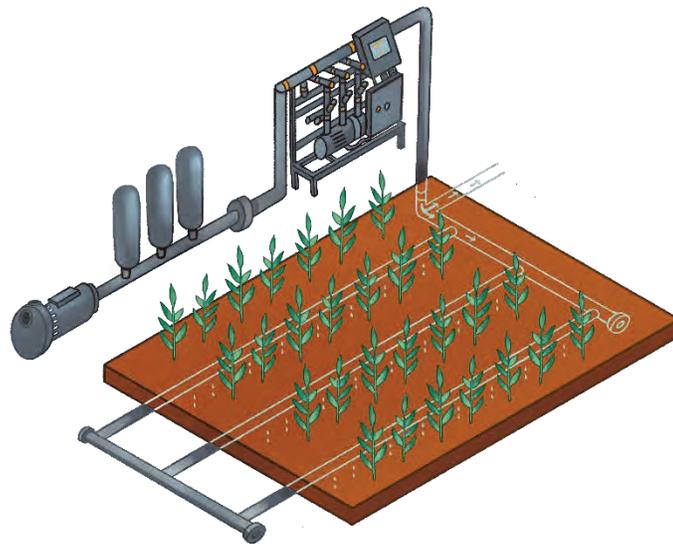


Figure 35. Composants d'un système d'irrigation goutte-à-goutte souterrain (1 pompe, 2 filtres, 3 vannes et régulateurs de pression, 4 boîtier de commande, 5 ligne principale, 6 rube/goutte-à-goutte/lignes).
Crédit photo : Dana Woodward.

Dans le cas des cultures horticoles en rangées, l'espacement des lignes et des goutteurs est choisi en fonction de l'espacement des plantes. Dans les cultures de plein champ, une ligne d'alimentation de plusieurs rangées de plantes. En raison du profil d'humidification non uniforme généré par l'irrigation goutte-à-goutte (souterraine), il faut prendre en compte la répartition latérale maximale de l'eau qui peut être obtenue dans le sol d'un champ. Dans les sols sableux, les lignes devront être placées plus près les unes des autres que dans les sols limoneux. Dans les sols fortement argileux, la faible conductivité hydraulique et les fissures peuvent également empêcher une forme régulière du profil d'humidification.

En pratique, un espacement de 0,85 m (sable loameux) à 1,0 m (loam argileux/loam limoneux/loam sablo-argileux) permet d'équilibrer la distribution de l'eau et les aspects économiques dans les champs

des prairies. Alors que les lignes et les goutteurs sont répartis uniformément dans un champ, l'irrigation est effectuée seulement dans certaines parties du champ à la fois afin de maintenir les besoins de pompage à un niveau bas et de permettre une certaine flexibilité spatiale dans les apports d'eau. Le groupe de zones dans un système qui doit être arrosé simultanément doit être choisi de manière à ce que l'ensemble du champ puisse être irrigué jusqu'au maximum des besoins hydriques de la culture en 24 heures.

Programmation de l'irrigation pour les systèmes d'irrigation goutte-à-goutte

Les principaux facteurs qui guident la programmation de l'irrigation goutte-à-goutte sont les mêmes que ceux guidant la programmation de l'irrigation avec un pivot central : type de culture, stade phénologique, conditions météorologiques, type de sol, teneurs en humidité du sol. Cependant, en raison de la grande différence de débit entre les goutteurs et les asperseurs aériens, les décisions relatives au moment, à la fréquence et aux quantités d'eau à apporter par arrosage doivent être appréhendées différemment.

Guide de programmation étape par étape

1. Déterminez l'humidité du sol : Utilisez un capteur d'humidité du sol ou une méthode précédemment décrite pour évaluer la teneur en eau à différentes profondeurs. Cela permet d'éviter une irrigation excessive ou insuffisante en fournissant des données en temps réel sur les teneurs en humidité du sol. En raison de l'humidification inégale autour des goutteurs, le choix du site d'installation du capteur ou d'échantillonnage par rapport aux lignes de distribution et aux goutteurs doit être pris en compte. Idéalement, un capteur est placé entre deux lignes de distribution et un autre plus près d'une ligne de distribution, à une distance de 10 à 15 cm d'un goutteur. Le premier capteur fournira des informations permettant d'évaluer les conditions d'humidité en début de saison (c'est-à-dire lorsque les systèmes racinaires ne sont pas complètement développés), tandis que le second fournira des informations sur les conditions d'humidité en milieu et en fin de saison et sur le potentiel de lessivage de l'eau dans la zone racinaire.
2. Calculez les besoins hydriques : Tenez compte des besoins hydriques de la culture selon son stade de croissance et les conditions climatiques locales.
3. Calculez le temps de fonctionnement des systèmes d'irrigation goutte-à-goutte. À noter que le calcul doit tenir compte à la fois de la durée de fonctionnement d'une zone et de toutes les zones du champ (équation 9 de l'annexe C, page 81; exemple 12 de l'annexe D, page 89) indique la durée de fonctionnement de l'irrigation par zone.
4. Ajustement de la fréquence : Comme les systèmes d'irrigation goutte-à-goutte dispensent de l'eau lentement, les quantités d'eau apportées en une seule application sont généralement faibles. Par conséquent, les systèmes doivent être entretenus plus fréquemment que les systèmes classiques à pivot central.
5. « constitution d'une réserve d'eau » : il est plus difficile de résoudre les problèmes d'humidité du sol avec les systèmes d'irrigation goutte-à-goutte, en particulier avec les systèmes souterrains. De plus grandes quantités d'eau peuvent être apportées durant les périodes où les besoins hydriques des cultures sont faibles. Cependant, un apport intense d'eau peut provoquer des conditions saturées et un lessivage rapide, car l'eau est injectée plus profondément dans la

zone racinaire. Ces événements peuvent être difficiles à observer, car ils se déroulent sous la terre. Il est donc préférable d'avoir une infrastructure de données spatiales (IDS) pour suivre régulièrement les besoins hydriques des cultures.

6. Surveillez et adaptez : Surveillez régulièrement les niveaux d'humidité du sol et la santé des plantes. Ajustez le programme d'irrigation au besoin pour tenir compte des changements de température, de la croissance des plantes et d'autres facteurs.

Circonstances particulières - la programmation de l'irrigation aux alentours de l'émergence des cultures

Lors de l'irrigation d'une culture de plein champ dont l'espacement entre les rangs est inférieur à l'espacement des lignes de goutte-à-goutte souterraines, il faut porter une attention particulière aux conditions d'humidité du sol aux alentours de l'émergence. Des applications fréquentes (petites) sont nécessaires pour créer un profil d'humidité qui permet la levée le long et entre les lignes d'approvisionnement en eau. Cela peut en effet conduire à une surirrigation au début de la saison de croissance, si les précipitations ne sont pas suffisantes pour aider la culture à germer. Cette surirrigation peut être compensée plus tard au cours de la saison de croissance en surveillant le bilan hydrique.

IRRIGATION À DÉBIT VARIABLE : APPLICATIONS DE L'AGRICULTURE DE PRÉCISION À L'IRRIGATION

L'irrigation à débit variable (IDV) est une pratique de gestion de l'irrigation qui fait appel à l'agriculture de précision – seule la quantité d'eau dont la culture a besoin (BONNE QUANTITÉ) est appliquée à l'endroit (BONNE PLACE) et au moment (BON MOMENT) où la culture en a besoin.

Les systèmes d'irrigation classiques sont conçus de manière à apporter une quantité d'eau uniforme dans le champ à tous les arrosages. Or, les champs ne sont pas uniformes et peuvent présenter des variations considérables en ce qui concerne l'élévation, la texture du sol, le type de culture et le stade phénologique des plantes. Il en résulte des différences de consommation d'eau et de besoins hydriques de la culture au sein d'un même champ. Grâce aux progrès technologiques accomplis dans le domaine de l'irrigation, les irrigants peuvent moduler l'irrigation par petites zones afin de mieux gérer la variabilité des besoins de la culture. Un meilleur contrôle de l'humidité du sol dans le champ réduit les risques d'irrigation excessive ou insuffisante, ce qui peut avoir une incidence considérable sur le rendement, la qualité et l'uniformité de maturité de la culture (Figure 36).



Figure 36. À gauche : Variabilité de l'humidité du sol entraînant de l'eau stagnante. À droite : variabilité dans le développement des cultures.

L'IDV à pivot central se décline en deux types :

- i) **Système d'irrigation à débit variable avec contrôle de la vitesse (contrôle unidimensionnel)** : La vitesse du pivot central varie à mesure qu'il se déplace. Une réduction de la vitesse augmente la profondeur d'irrigation, et à l'inverse, une augmentation de la vitesse réduit la profondeur d'irrigation. Ce mode de gestion se limite à contrôler la profondeur d'irrigation dans les segments circulaires formés autour du champ (Figure 37 a).

- ii) **Système d'irrigation à dose variable par gestion spécifique de petites zones (contrôle bidimensionnel)** : Dans ce système de pivot, deux variables sont contrôlées, soit la vitesse du pivot et le fonctionnement des gicleurs (commande d'ouverture et de fermeture des vannes). L'irrigant peut ainsi moduler la dose d'irrigation selon les besoins de petites zones le long du système d'irrigation (Figure 37 b).

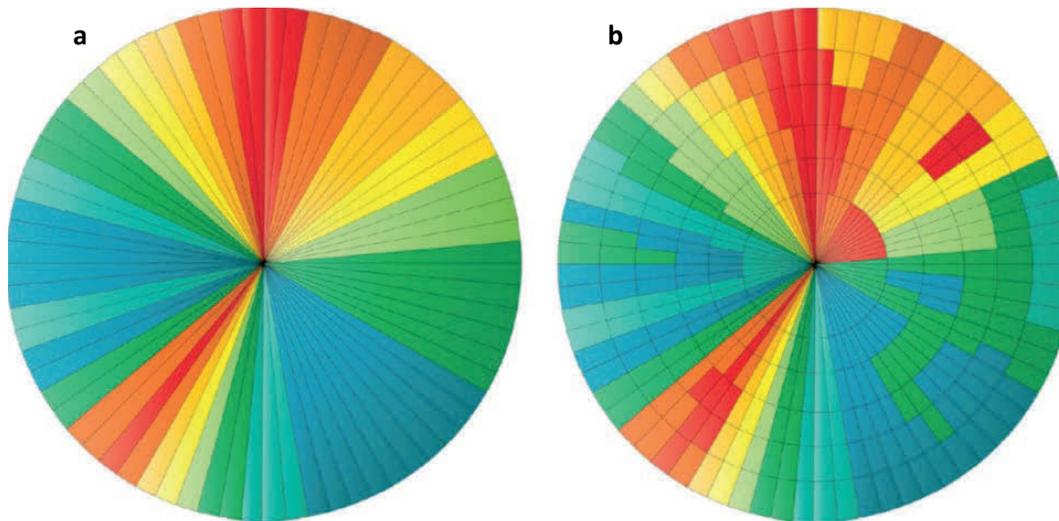


Figure 37. Schéma d'un plan d'IDV : a) contrôle de la vitesse et b) contrôle de la vitesse + de la gestion spécifique de petites zones

Chaque système d'IDV par gestion spécifique de petites zones (IDV-GSPZ) est unique dans la façon dont les zones sont configurées (nombre de gicleurs) et contrôlées (électrique, hydraulique, pneumatique), et chaque système peut être adapté aux besoins particuliers de votre champ. Il est important de comprendre les processus hydrauliques qui se produisent dans votre système d'irrigation classique et comment ils changeront s'il est converti en un système d'IDV-GSPZ.

Les systèmes d'IDV-GSPZ fonctionnent par l'activation/désactivation des gicleurs sur toute la longueur du système d'irrigation pendant son déplacement dans le champ. Cette pulsation ou cycle des gicleurs permet de réguler l'application d'eau en fonction des prescriptions de l'utilisateur. Les gicleurs sont activés à l'aide d'une vanne de commande montée entre le tuyau de la travée pivotante et la buse du gicleur.

Les systèmes à pivot central classiques fonctionnent à un débit et à une pression relativement constants, appliquant une quantité d'eau uniforme dans le champ, la profondeur d'application variant selon le temps de déplacement des systèmes. Avec l'IDV-GSPZ, le débit est à flux constant, lequel est fonction du nombre de gicleurs qui tournent à un moment donné. Les pompes d'irrigation sont conçues pour générer une pression constante à un débit fixe. Lorsque le débit fluctue, comme c'est le cas avec l'IDV-GSPZ, la pression peut augmenter (lorsque le débit est restreint) ou diminuer (lorsque le débit augmente). Ces ondes de pression peuvent entraîner des changements dans la performance des gicleurs et, plus grave encore, des tensions sur les conduites d'irrigation, ce qui peut causer une défaillance prématurée.

Pour prolonger la durée de vie de vos composants d'irrigation et assurer que les gicleurs fonctionnent comme prévu, les composants suivants doivent être pris en compte dans un système d'IDV-GSPZ :

- Les régulateurs de pression des gicleurs sont des dispositifs à ressort montés sur chaque gicleur. Ces dispositifs simples maintiennent la pression des gicleurs en veillant à ce que les débits soient conformes aux spécifications.
- Vannes de contrôle - Les vannes de contrôle de la pression d'irrigation sont généralement des systèmes à membrane installés dans une canalisation. Ces systèmes sont conçus pour ouvrir/fermer (constriction) afin de réguler la pression sur le côté en aval de la vanne.
- Entraînements à fréquence variable - Les régulateurs et les vannes de régulation sont conçus pour maintenir la pression en aval du pipeline, mais ils produisent des pics de pression importants qui ont un impact sur les systèmes en amont, y compris la pompe. Les entraînements à fréquence variable (EFV) sont des systèmes électroniques capables d'accélérer ou de ralentir une pompe en faisant varier la fréquence de l'alimentation électrique. En réglant la vitesse de la pompe pour répondre aux exigences de débit et de pression en aval, les pics de pression excessifs sont limités, ce qui prolonge la durée de vie des composants d'irrigation.

Prescriptions d'arrosage dans un système d'IDV

Les systèmes d'IDV ajoutent une composante spatiale à la programmation d'irrigation classique. Certaines méthodes de programmation de l'irrigation sont plus faciles à adapter que d'autres (p. ex., surveillance par télédétection comparativement à la surveillance sur place), mais toutes les méthodes peuvent être adaptées.

Pour commencer, l'IDV exige une carte spatiale d'irrigation, appelée prescription d'IDV. Les prescriptions d'IDV ont deux composantes : les zones (spatiales) et les débits (profondeurs). Les zones sont des sites gérés de manière similaire. Le nombre de zones et le débit d'irrigation appliqué dans chaque zone dépendent de la variabilité du champ et de la capacité du système d'irrigation.

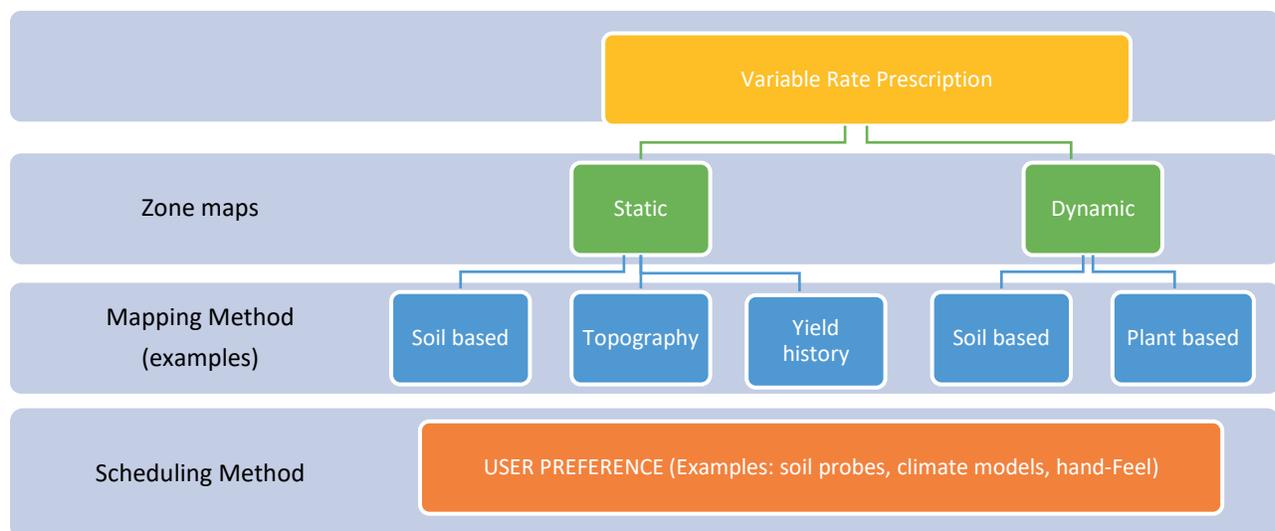


Figure 38. Variable Rate Irrigation prescription development method options.

Les zones d'IDV sont cartographiées au moyen d'une des deux méthodes de gestion suivantes (Figure 38) :

- **Statique** : Les zones d'irrigation sont créées au début de la saison et demeurent les mêmes (statiques) pendant toute la saison. La profondeur d'application dans chaque zone peut changer au cours de l'année, mais les limites des zones restent les mêmes.
- **Dynamique** : Des zones d'irrigation sont créées au début de la saison et leurs limites sont continuellement ajustées tout au long de la saison à mesure que des données spatiales deviennent disponibles.

Chaque méthode présente des avantages (simple ou complexe) et des inconvénients (limitée ou adaptable). La méthode de gestion devra être adaptée au système de gestion.

Zones statiques d'IDV

La méthode des zones statiques de gestion de l'IDV comporte trois grandes étapes : la cartographie, la gestion et l'évaluation des zones.

Cartographie des zones

Les zones statiques de gestion sont établies en fonction de données de terrain qui ont été recueillies en d'autres temps que la saison de croissance. Les zones établies ne seront pas modifiées au cours de la saison de croissance. Les types de levés les plus fréquemment utilisés portent sur la texture du sol, la topographie, la fertilité et le rendement.

Texture du sol

Puisque la texture du sol influe considérablement sur la capacité de rétention d'eau qui, à son tour, influe sur la disponibilité de l'eau pour la croissance de la culture, elle est un facteur clé dans la programmation de l'irrigation. C'est donc un élément essentiel pour la délimitation de zones d'IDV. Les cartes pédologiques existantes peuvent constituer un point de départ pour la cartographie de la texture des sols (Figure 39, Exemple 13 de l'annexe D, page 90). Cependant, comme ces cartes ont une faible résolution (en général 1:100 000 ou moins), elles doivent être complétées par un échantillonnage de sol.

Conductivité électromagnétique et électrique

Les instruments électromagnétiques (EM) (Figure 39) mesurent la conductivité électrique (CE) du sol dans un champ (exprimée en milliSiemens/mètre). Les principaux facteurs influant sur les valeurs de CE sont la texture (dimension des particules), l'humidité et la salinité du sol (et dans une moindre mesure, la compaction et la température). Une valeur élevée de CE pourrait indiquer une salinité élevée, une teneur élevée en argile, un taux d'humidité élevé (une dépression, une source) ou une combinaison de ces facteurs. Une faible valeur de CE pourrait correspondre à une butte érodée, à une zone relativement élevée ou à un sol sableux ou graveleux ou à une combinaison de facteurs. Pour élucider ces problèmes, prélevez des échantillons de sol dans les zones anormales ainsi

Gestion de zones statiques

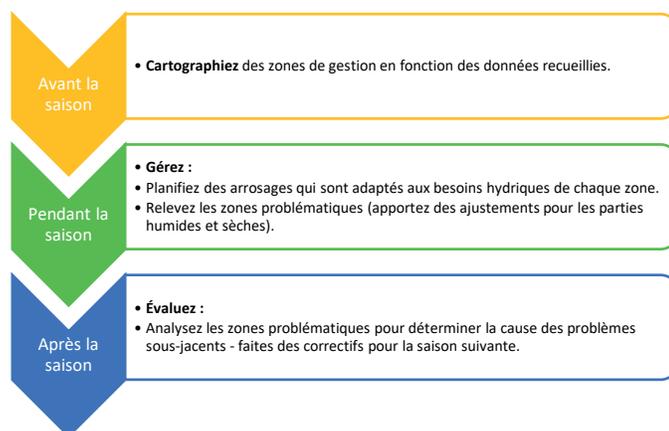


Figure 39. Capteur électromagnétique (EM) monté sur un traîneau de terrain pour la réalisation de levés EM et

que dans quelques sites moyens ou représentatifs. On utilise ensuite ces données pour dresser une carte spatiale de la texture et de la salinité des sols en groupant les surfaces aux valeurs ajustées de CE similaires, puis en les ajustant avec les données d'analyses de sol et l'historique des champs (p. ex., mauvaises récoltes, population élevée de kochia).

Le nombre de zones de gestion d'irrigation tracées à l'aide d'une carte des textures et de la salinité du sol à partir de la CE devrait être choisi selon le degré de confort de l'irrigant à gérer des zones (Figure 40 b, Exemple 14 de l'annexe D, page 91).

Topographie

Bien qu'il ne s'agisse pas d'une relation absolue, les relations entre l'humidité du sol et la topographie suivent certaines tendances bien établies (Yari et al, 2017) :

- Les surfaces de terrain plus élevées (côtes, buttes) sont plus sujettes à l'érosion, à l'évaporation et au drainage interne vers le bas de la pente.
- Les dépressions de terrain ont tendance à collecter l'eau.

Les zones peuvent être groupées selon leur élévation (haut de pente, milieu de pente, bas de pente et dépressions localisées). Les données topographiques à elles seules sont insuffisantes pour permettre de dresser une bonne carte d'IDV, mais elles peuvent s'avérer utiles pour compléter les cartes pédologiques existantes et localiser des caractéristiques ou des réponses qui n'y sont pas représentées (Figure 40c, Exemple 15 de l'annexe D, page 91).

Cartes de rendement

Une carte des rendements s'avère un bon indicateur de la productivité dans le cadre de pratiques de gestion normales. On suppose que les aires ou les zones de productivité similaires ont des besoins hydriques similaires pendant toute la saison. On préparerait les prescriptions d'IDV de la même façon que dans les autres méthodes statiques (basées sur la CE ou la topographie) en groupant les zones qui ont des plages de rendement similaires (p. ex., tiers supérieur, tiers médian et tiers inférieur).

Mise en contexte

Les méthodes cartographiques de zones statiques utilisent des levés ou des données de terrain qui ont été recueillies en dehors de la saison de végétation. À chaque type de levé est associé un type de carte particulier, mais qu'importe le type de cartes, ces dernières ont toutes des points en commun (Figure 37). En prenant la texture du sol comme point de départ, on peut utiliser d'autres données pour affiner les zones de gestion de l'irrigation.

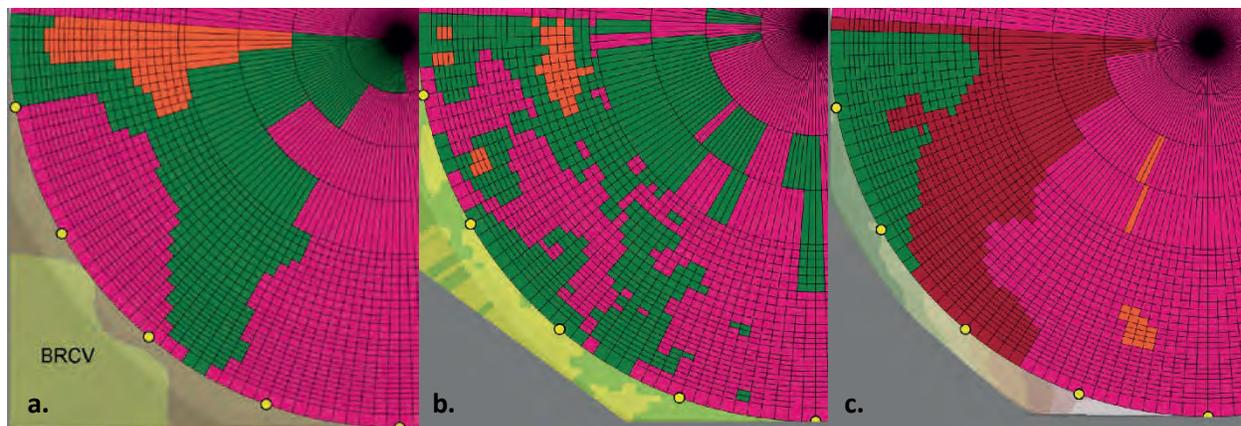


Figure 40. Exemples de cartes de zones statiques basées sur (a) la texture du sol, (b) la conductivité électrique, (c) la topographie pour le même champ.

Gestion des zones

Une fois que des zones de gestion ont été délimitées, l'irrigant élabore un programme d'irrigation pour chaque zone à l'aide de la méthode de programmation de son choix. Son approche peut être basée sur le sol (p. ex., p. ex., en évaluant l'humidité du sol à l'aide d'un tensiomètre ou au moyen de la méthode d'évaluation qualitative de l'humidité du sol au toucher), sur les données météorologiques (p. ex., à l'aide de la méthode du bilan hydrique) ou sur les plantes (p. ex., au moyen du programme IrriCAN). Il est important que vos choix de zones et de méthode soient faits en fonction de ce qui convient le mieux à votre système de production, tout en tenant compte des coûts, de l'emplacement, de la main-d'œuvre, etc.

Évaluation des zones

À la fin de la saison d'irrigation, évaluez la performance de vos cartes de zones afin de déterminer si votre méthode de gestion vous a permis d'obtenir les résultats escomptés. Votre évaluation peut consister à faire tout simplement des observations tout au long de la saison de croissance et à noter les zones problématiques (humides/sèches). Une analyse plus poussée peut comprendre l'examen des cartes de rendement ou des indices NDVI pour relever les zones problématiques ou affiner les zones délimitées. Il est important que vous continuiez à évaluer les zones d'irrigation pour vous assurer que votre investissement dans un système d'IDV donne les résultats escomptés.

Zones dynamiques d'IDV

Des zones dynamiques de gestion sont délimitées au début de la saison de croissance. Les limites de ces zones sont rajustées tout au long de la saison à mesure que d'autres données sont recueillies, suivant un processus de cartographie, de gestion (y compris la collecte et le rajustement continus des données) et d'évaluation.

Cartographie des zones

L'avantage des cartes de réponses dynamiques est que les décisions d'irrigation reposent sur la surveillance de l'état hydrique du sol et/ou sur la réponse des plantes aux conditions ambiantes. C'est la meilleure représentation possible des stress que subissent les plantes tout au long de la saison.

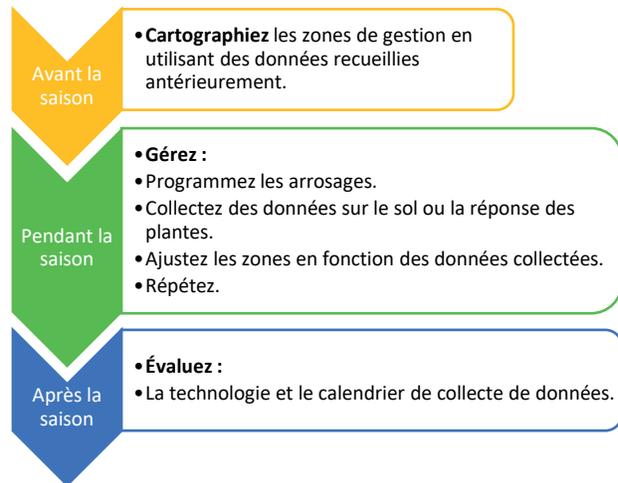
La création de zones dynamiques pour la gestion de l'IDV est plus complexe que la création de zones statiques, car ce mode de gestion implique la collecte de données additionnelles et l'apport continu d'ajustements aux prescriptions d'IDV tout au long de la saison. La collecte de données se fait uniquement par télédétection, car des échantillonnages continus *in situ* finiraient par endommager la culture. Grâce aux progrès accomplis en télédétection et en cartographie automatisée, la cartographie dynamique intensive exige désormais beaucoup moins de main-d'œuvre et de temps.

Gestion basée sur le sol

Les technologies disponibles pour surveiller à distance l'humidité des sols sont limitées. Une nouvelle technologie repose sur l'utilisation de radiomètres à hyperfréquences pour l'estimation de l'humidité du sol. Cette technologie de télédétection qui est relativement nouvelle en agriculture était utilisée par la NASA pour estimer l'état hydrique des sols à grande échelle. Les radiomètres à hyperfréquences mesurent les émissions spécifiques de longueurs d'onde dans le spectre des micro-ondes par le sol. À l'instar des sondes TDR et des sondes capacitatives, l'humidité du sol influe sur les émissions de micro-ondes. Selon la longueur des micro-ondes (c.-à-d. la fréquence), la profondeur de détection varie de 5 à 30 centimètres (de 2 à 12 pouces).

Comme le traitement des données est complexe, les capteurs disponibles sont reliés à un fournisseur de service par abonnement pour dresser des cartes d'humidité du sol (p. ex., SMARTDROP, Figure 41). Étant donné que les cartes dressées avec des données de radiomètres à hyperfréquences rapportent l'humidité du sol en humidité volumique, ces cartes peuvent servir à cartographier des zones d'irrigation ET à programmer l'irrigation.

Gestion de zones dynamiques d'IDV



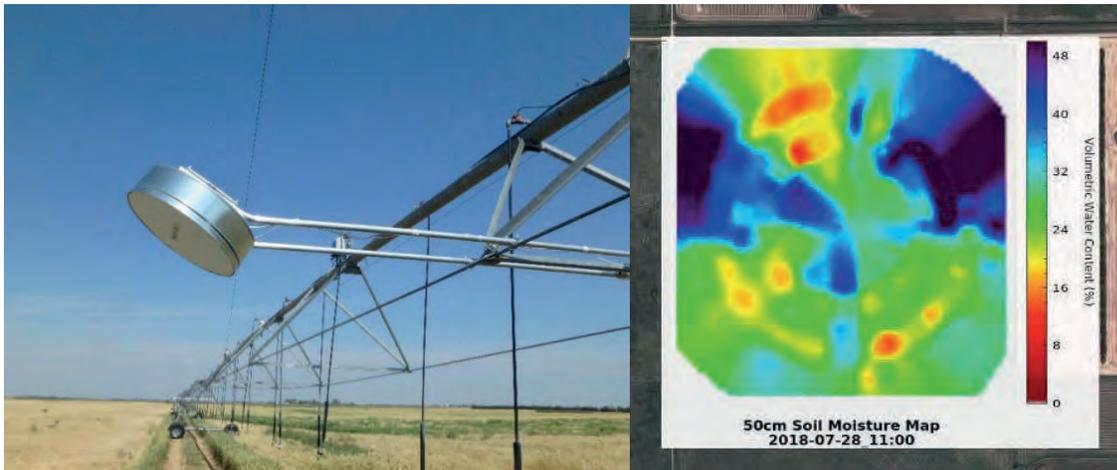


Figure 41. À gauche : Radiomètre à hyperfréquences SmartDROP. À droite : carte de

La figure 42 illustre de quelle manière l'imagerie radiométrique représente les conditions hydriques du sol d'un champ et le degré auquel ces conditions peuvent changer en l'espace d'une semaine à peine. Sur l'image du 8 août, on remarque que certaines zones du champ sont devenues plus humides (zone 1), et que d'autres sont devenues plus sèches (zone 2). Cette différence pourrait être attribuable à l'irrigation sur le côté gauche seulement ou à la topographie, l'eau s'écoulant de haut (à droite) en bas (à gauche) après une pluie ou un arrosage.

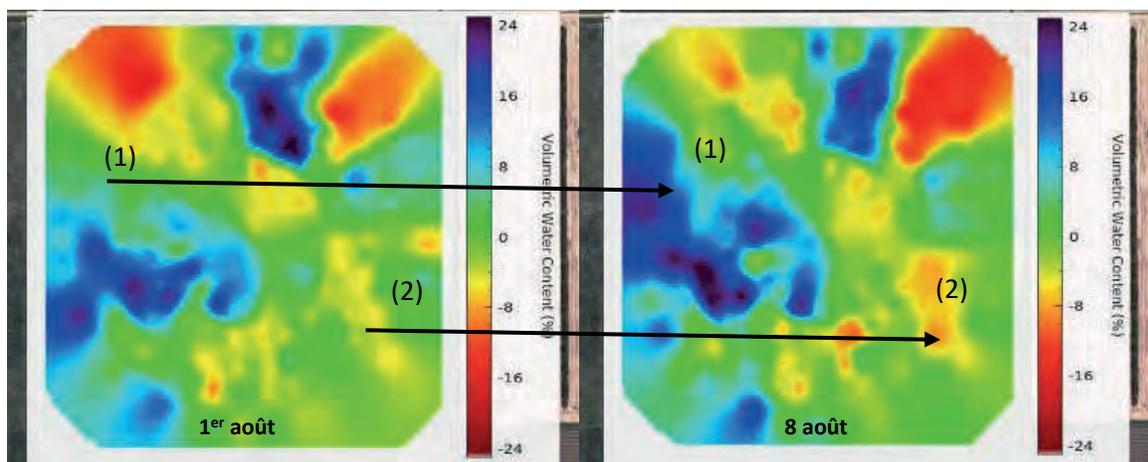


Figure 42. Images du même champ de canola prises par un radiomètre à hyperfréquences à une semaine d'intervalle. Les valeurs représentent pour le jour de la capture de l'image, la différence par rapport à la teneur moyenne en humidité du sol en pourcentage d'humidité volumique. Les flèches indiquent les zones où l'état hydrique a changé (c.-à-d. les zones qui

Gestion basée sur la réponse des plantes

La cartographie basée sur les plantes utilise des données de télédétection sur la réponse des plantes au stress hydrique (excès/déficit d'eau) pour délimiter des zones de gestion. Les options de télédétection disponibles pour surveiller le stress des plantes comprennent i) l'indice NDVI et ii) la température du couvert végétal de la culture ou l'indice de stress hydrique de la culture.

Indice de végétation par différence normalisée : Les valeurs des indices de végétation par différence normalisée peuvent être divisées en trois grands groupes : valeurs élevées, valeurs moyennes et valeurs

faibles et les champs peuvent être cartographiés selon ces catégories. Après la réception de toute nouvelle image, les zones peuvent être cartographiées à nouveau selon ces trois catégories (Exemple 16 de l'annexe D, page 92).

En l'absence d'images à jour (p. ex., en raison de la couverture nuageuse) ou pour les temps de la saison où les images de télédétection ne reflètent pas précisément les estimations d'humidité du sol, de productivité des cultures ou de stress des plantes (p. ex., en début de saison, avant la fermeture du couvert végétal), on peut utiliser des images ou données historiques pour cartographier les champs. Les photos historiques peuvent également aider à déterminer où et quand les cultures sont les plus vulnérables au stress, et à mieux comprendre la distribution de l'eau dans le champ après un arrosage ou une pluie (p. ex., par où l'eau arrive et vers où elle s'écoule) (Figure 43).

Température du couvert végétal de la culture/indice de stress hydrique de la culture : La température interne de la feuille se maintient à la température de l'air ou proche d'elle grâce à l'effet de

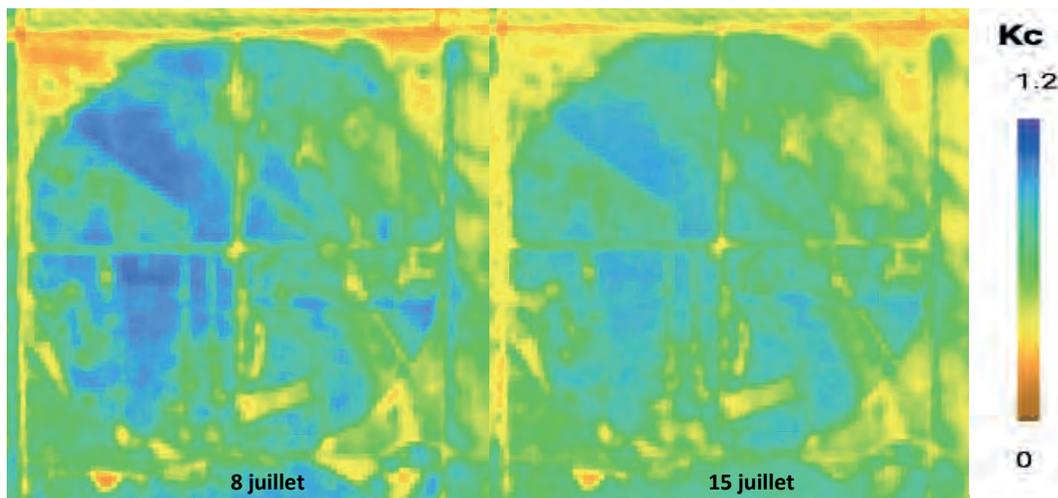


Figure 43. Images NDVI du 8 juillet (à gauche) et du 15 juillet (à droite). Globalement, l'état sanitaire général de la culture s'est détérioré au cours de cette période, ce qui dénote un possible déficit hydrique pour le maintien de la santé de la culture. Gestion

refroidissement de l'eau transpirée qui s'évapore à la surface de la feuille. On peut donc utiliser la variabilité de la température du couvert végétal dans l'ensemble du champ pour estimer la capacité de rétention d'eau du sol. Les zones de sol qui ont une faible capacité de rétention d'eau présentent une augmentation plus rapide des températures du couvert végétal que les sols à capacité plus élevée (Bauer, 2019). On peut regrouper les différentiels de températures (couvert végétal par rapport à l'air) en grandes plages de températures pour délimiter des zones.

Gestion des zones

Gestion basée sur le sol

On peut utiliser l'état hydrique du sol qui a été déterminé par télédétection en combinaison avec des estimations des besoins hydriques de la culture (p. ex., effectuées à l'aide de coefficients spécifiques à la culture et aux stades phénologiques) pour programmer l'irrigation de chaque zone délimitée. Par exemple, le système SmartDROP (radiomètre à hyperfréquences) rapporte l'humidité volumique en pourcentage (Figures 41 et 42). La texture du sol peut être utilisée pour déterminer la réserve en eau utile de chaque zone ((Tableau A3 de l'annexe A, page 73). Avec ces deux éléments d'information, il est

relativement simple de déterminer la quantité d'eau à appliquer lors du prochain arrosage programmé pour amener le sol de chaque zone à la capacité au champ.

En effectuant une analyse plus poussée des cartes d'humidité du sol au fil du temps, on peut dégager des profils de distribution hydrique (c.-à-d. voir les endroits où l'eau tend à s'accumuler après un arrosage ou une pluie). Ces informations peuvent être utilisées pour affiner le programme d'irrigation afin d'égaliser l'humidité du sol dans l'ensemble du champ. Par exemple, les zones où l'humidité du sol est proche ou juste au-dessus du dessèchement maximal permis seraient irriguées pour combler les besoins hydriques de la culture jusqu'au prochain arrosage programmé (MAINTIEN). Les zones humides (p. ex., proches de la capacité au champ) nécessiteraient seulement un apport d'eau qui vise à maintenir l'humidité du sol au-dessus du dessèchement maximal permis (il se peut qu'on n'ait pas besoin d'arroser, RETRAIT). Les zones plus sèches devraient être irriguées suffisamment pour accroître le taux d'humidité du sol afin d'atténuer le stress hydrique potentiel de la culture (p. ex., jusqu'au dessèchement maximal permis) **et** suffisamment pour combler les besoins hydriques de la culture (RATTRAPAGE). On recalculerait les quantités d'eau d'irrigation à chaque arrosage programmé selon la variation de l'état hydrique du sol depuis le dernier arrosage.

Gestion basée sur la réponse des plantes

Indice de végétation par différence normalisée : Les valeurs de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) sont étroitement corrélées aux besoins hydriques de la culture : des valeurs NDVI élevées sont associées à une culture qui a un couvert végétal épais et luxuriant (besoins hydriques élevés); des valeurs NDVI faibles sont associées à un couvert végétal peu dense et clairsemé (besoins hydriques plus faibles). On peut se servir de cette relation pour convertir les valeurs NDVI en coefficients de consommation d'eau de la culture, puis les intégrer dans des équations ou des modèles de consommation d'eau de la culture afin d'estimer les besoins d'irrigation dans chaque zone. Un des avantages est que ces données sont indépendantes de la culture et du stade phénologique, ce qui réduit le besoin de recourir à des publications de coefficients de consommation d'eau des cultures (a) qui ont été calculés à partir de données historiques (ces coefficients pourraient ne plus être exacts) et (b) qui peuvent ne pas être disponibles pour votre région.

Température du couvert végétal de la culture/indice de stress hydrique de la culture : Le rapport entre la température du couvert végétal de la culture et la température de l'air ambiant peut être un indicateur de la réserve en eau utile. Cette méthode indique seulement le stress hydrique relatif de la culture (p. ex., indice de stress hydrique de la culture) et non l'état hydrique du sol ou les besoins d'irrigation réels. Cette méthode doit donc être utilisée en conjonction avec une méthode de programmation d'irrigation existante. D'autres indices (p. ex., seuil temps-température) qui tiennent compte de la température du couvert végétal sont en cours d'évaluation dans le but de fournir de meilleures indications sur les moments où il est nécessaire.

Évaluation des zones

Le principe de base de la programmation dynamique de zones d'irrigation consiste à ajuster en continu les prescriptions d'irrigation pendant toute la saison d'irrigation. Les zones et les profondeurs d'irrigation sont rajustées en fonction de chaque nouvel ensemble de données ou chaque nouvelle image. On peut compléter l'évaluation effectuée en cours de saison par une vérification de l'état hydrique du champ et de l'état de la culture pour s'assurer que le système de programmation de l'irrigation fonctionne comme prévu.

À la récolte, les cartes de rendement peuvent compléter l'analyse de la performance du système d'irrigation. Les questions à se poser sont les suivantes :

- Le rendement moyen a-t-il augmenté?
- La variation de rendement a-t-elle diminué dans le champ?
- Comment les zones à faible rendement ont-elles réagi?
- Comment les zones à rendement élevé ont-elles réagi?
- Dans quelle mesure la carte des variations de rendement correspond-elle aux zones d'irrigation cartographiées?

Automatisation

Grâce aux progrès accomplis dans les technologies des capteurs, du traitement informatique et de l'intelligence artificielle, des systèmes automatisés de prescription à débit variable arrivent sur le marché (Figure 44). Ces systèmes utilisent des capteurs exclusifs montés sur le système d'irrigation pour surveiller en permanence les variables indicatives du stress hydrique des plantes. Grâce à l'intelligence artificielle, le système informatique « apprend » à ajuster le débit des gicleurs tout au long de l'année afin de réduire au minimum la disponibilité de l'eau pour les plantes.

Bien que ces systèmes automatisés aident à développer des prescriptions d'IDV pour l'utilisateur, il demeure important de mettre en place un programme d'irrigation, au moyen de l'une des approches recommandées précédemment (gestion basée sur le sol, la météo ou sur la plante) pour savoir quand il



est temps d'irriguer.

Figure 44 . Capteurs et vannes montés sur un système d'irrigation à pivot central dans le cadre d'un système d'irrigation à débit variable pour la gestion spécifique de petites zones (IDV-GSPZ) (InteliRain, 2023)

QUAND FAUT-IL ARRÊTER D'IRRIGUER?

Il faut programmer la dernière irrigation de manière à apporter suffisamment d'eau au sol pour soutenir la culture jusqu'à ce qu'elle parvienne à maturité. Or, l'apport d'eau inutile en fin de saison, selon la culture et le stade phénologique de la culture, peut avoir peu ou pas d'effet sur le rendement final, engendrer des coûts d'intrants additionnels (pompage, eau) et user inutilement l'équipement. En outre, un sol humidifié par un arrosage inutile peut retarder la récolte (peut influencer sur la maturité/le taux d'humidité des grains, l'accès au champ) et favoriser la compaction du sol par la machinerie lourde de récolte. De s'abstenir d'irriguer en fin de saison comporte un autre avantage : il permet au sol de s'assécher et d'accroître sa capacité de rétention de la neige fondue et des précipitations printanières, réduisant ainsi le ruissellement. (Tableau A9 de l'annexe A, page 75; Exemple 17 de l'annexe D, page 93).

AIDE OFFERTE POUR LA PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION

Comme l'eau d'irrigation est une ressource publique et que sa disponibilité peut fluctuer d'une année à l'autre, il est important de s'assurer qu'elle est utilisée d'une manière efficiente. L'apport d'une quantité inadéquate d'eau (trop ou trop peu) à un moment inopportun peut stresser la culture ou augmenter le risque d'apparition de maladies. Ces problèmes peuvent occasionner une baisse de rendement et accroître les coûts.

Les agronomes et les employés des ministères de l'Agriculture qui sont spécialisés dans le domaine de l'irrigation peuvent offrir une aide technique pour effectuer des programmes d'irrigation et faire des démonstrations pratiques chez les irrigants.

Les agronomes provinciaux spécialisés en irrigation peuvent travailler tout au long de la saison avec les irrigants, qu'ils soient nouveaux ou déjà en opération, pour s'assurer qu'ils comprennent bien les principes de base d'un programme d'irrigation efficace. À la fin de la saison, l'irrigant possédera les connaissances techniques et les compétences pratiques pour être capable de programmer par lui-même à l'avenir.

Contactez le bureau des services de vulgarisation et d'aide aux irrigants de votre province ou du gouvernement fédéral pour obtenir de l'aide :

Alberta :

Ministère de l'Agriculture et de l'Irrigation de l'Alberta

Sans frais : 310-FARM (3276) (en Alberta)

Téléphone : 403-742-7901 (à l'extérieur de l'Alberta)

Courriel : 310farm@gov.ab.ca

Saskatchewan :

Bureau de l'irrigation – Ministère de l'Agriculture de la Saskatchewan

Téléphone : 1-306-867-5500

Courriel : irrigation@gov.sk.ca

Manitoba :

Téléphone : 844-769-6224 (Renseignements généraux)

Courriel : agriculture@gov.mb.ca

Gouvernement du Canada :

Centre Canada-Saskatchewan de recherche sur la diversification de l'irrigation

Téléphone : 306-867-5400

Courriel : aaafc.csidc-crdi.aac@agr.gc.ca

ANNEXE A : FIGURES ET TABLEAUX DE RÉFÉRENCES

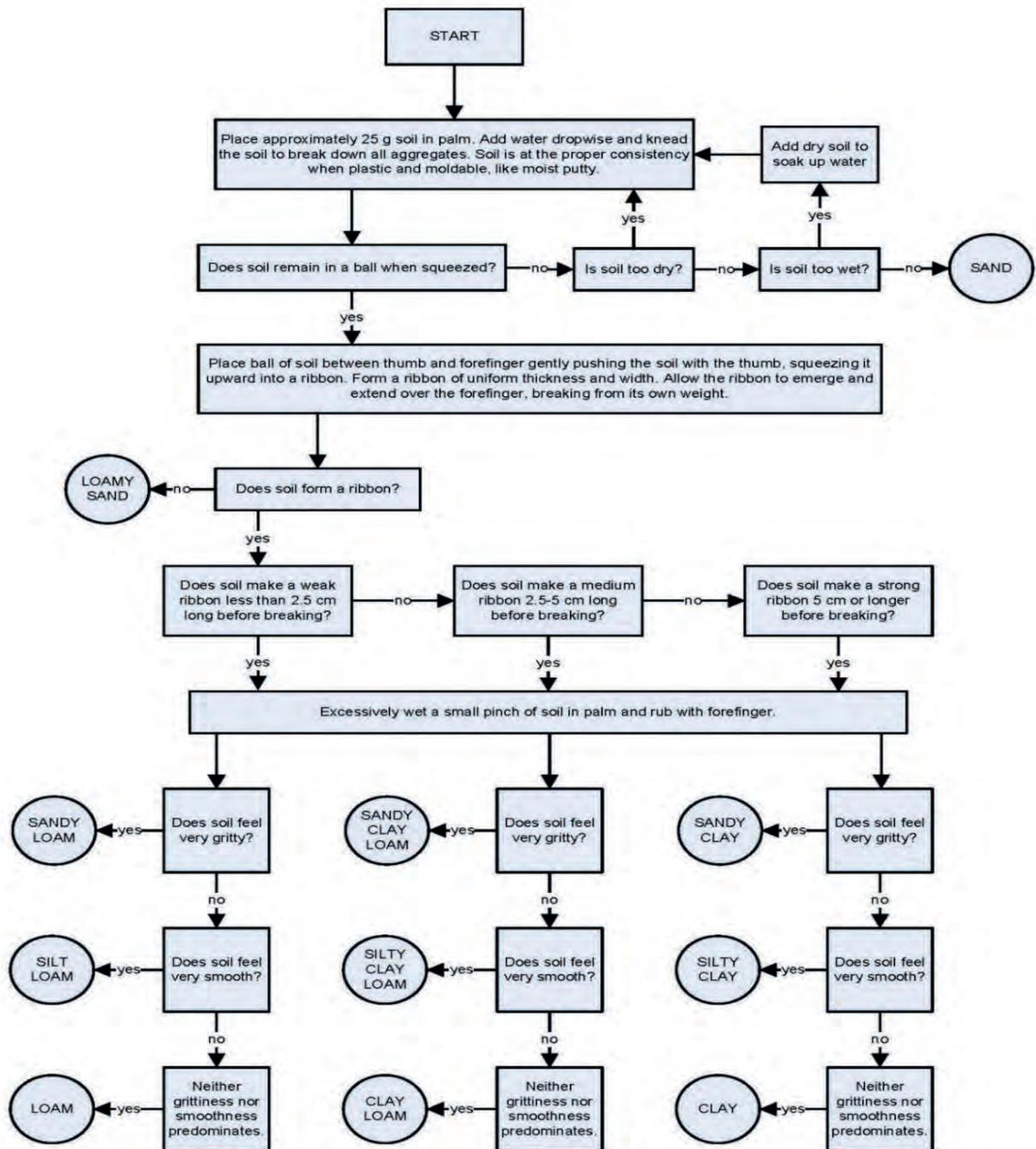


Figure A1. Méthode d'évaluation de la texture du sol au toucher (technique du boudin). Détermination de la texture du sol par la « méthode d'évaluation de la texture du sol au toucher ». Redessiné à partir de « A Flow Diagram for Teaching Texture-by-Feel Analysis », par Steve J. Thien,

Tableau A1. Recommandations pour la qualité des eaux visant à protéger l'agriculture (Irrigation)

Paramètre	Concentration (µg/L)
Aluminium	5 000
Arsenic	100
Béryllium	100
Bore	Variable*
Cadmium	5,1
Chlorure	Variable*
Chrome, hexavalent (Cr(VI))	8
Chrome, trivalent (Cr(III))	4,9
Cobalt	50
Cuivre	Variable*
Fluorure	1000
Fer	5000
Plomb	200
Linuron	0,071
Lithium	2500
Manganèse	200
Molybdène	10 pour une utilisation continue sur tous les sols 50 pour une utilisation à court terme sur des sols acides
Nickel	200
Sélénium	Variable*
Uranium	10
Vanadium	100
Zinc	1000 lorsque le pH du sol est < 6,5 5000 lorsque le pH du sol est > 6,5
Aldicarbe	54,9
Atrazine	10
Bromacil	0,2
Bromoxynil	0,33
Chlorothalonil	5,8 (autres cultures)
Cyanazine	0,5
Dicamba	0,006
Diclofop-méthyl	0,18
Diisopropanolamine	2 000
Dinosèbe	16
Métolachlore	28
Métribuzine	0,5
Simazine	0,5
Sulfolane	500
Tébutiuron	0,27 (céréales, foins cultivés et pâturages)
Coliformes fécaux (<i>Escherichia coli</i>)	100 par 100 ml
Coliformes totaux	1 000 par 100 ml

* Des recommandations relatives à ces paramètres qui sont spécifiques aux cultures peuvent être consultées à <https://ccme.ca/fr/priorites-actuelles/recommandations-canadiennes-pour-la-qualite-de-lenvironnement>

Tableau A2 : Tolérance des cultures et incidences de la salinité de l'eau (CE_w) ou de la salinité du sol (CE_e) sur le potentiel de rendement des cultures. (Ayers et Westcot, FAO, 1994)

Culture	Potentiel de rendement							
	100 %		90 %		75 %		50 %	
	CE _e	CE	CE _e	CE	CE _e	CE	CE _e	CE
Orge	8,0	5,3	10	6,7	13	8,7	18	12
Blé	6,0	4,0	7,4	4,9	9,5	6,3	13	8,7
Soja	5,0	3,3	5,5	3,7	6,3	4,2	7,5	5,0
Maïs	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9
Haricots	1,0	0,7	1,5	1,0	2,3	1,5	3,6	2,4
Brocoli	2,8	1,9	3,9	2,6	5,5	3,7	8,2	5,5
Pomme de terre	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9
Carotte	1,0	0,7	1,7	1,1	2,8	1,9	4,6	3,0
Agropyre	7,5	5,0	9,9	6,6	13	9,0	19	13
Luzerne	2,0	1,3	3,4	2,2	5,4	3,6	8,8	5,9

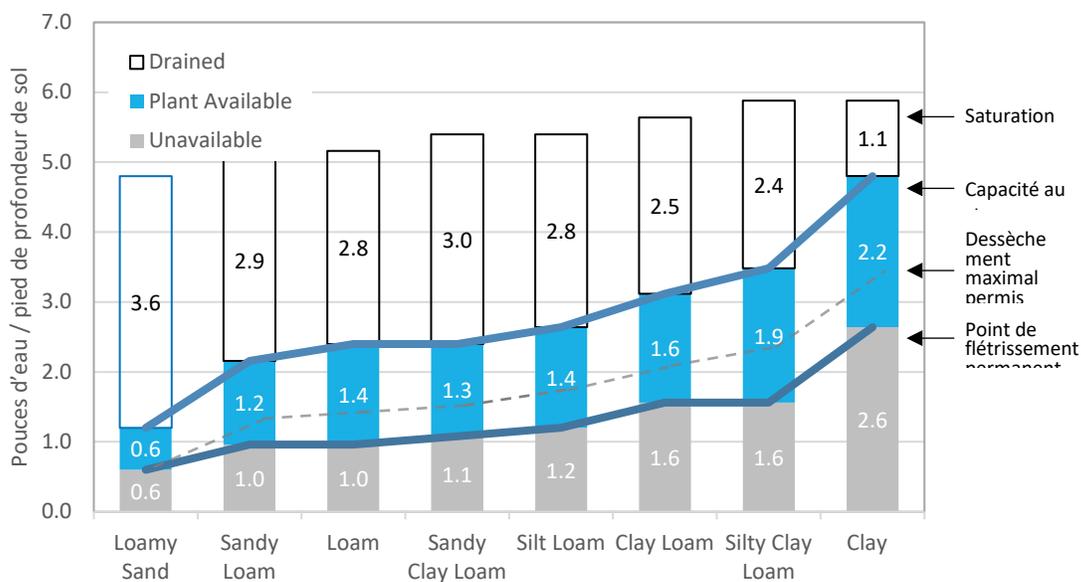


Figure A2. Relation entre la saturation, la capacité au champ et le point de flétrissement permanent pour les textures de sol communes

Tableau A3. Caractéristiques physiques des sols moyens

Texture	Capacité au champ * %	Point de flétrissement* %	Eau disponible à la capacité de rétention* %	Eau disponible à la capacité au champ Pouces/pieds	Taux d'infiltration**	
					mm/ h	po/h
Sable loameux (SL)	10	5	5	0,84	25	1,00
Loam sableux (LS)	18	8	10	1,68	18	0,70
Loam sableux fin (LSF)	20	9	11	1,85	15	0,60
Loam sableux très fin (LSTF)	22	10	12	2,02	13	0,50
Loam limoneux (LL)	22	10	12	2,02	9	0,35
Loam (L)	24	12	12	2,01	8	0,30
Loam argileux (LA)	26	13	13	2,23	6	0,25
Argile (A)	40	22	18	3,02	4	0,15

*% d'eau par unité de poids - études réalisées de manière aléatoire dans la zone de sol brun foncé

**Expérience de terrain et analyses effectuées par O.P. Bristol. % exprimé en poids

Tableau A4. Profondeur maximale de la zone racinaire active pour diverses cultures.

Culture	Zone racinaire active en centimètres (pieds)	Culture	Zone racinaire active en centimètres (pieds)
Luzerne	120 (4,0)	Lin	100 (3,0)
Orge	100 (3,0)	Graminée	80 (2,5)
Haricots, secs	60 (2,0)	Lentilles	60 (2,0)
Féveroles	80 (2,5)	Pois	80 (2,5)
Canola	100 (3,0)	Pomme de terre	80 (2,5)
Maïs, ensilage	100 (3,0)	Blé	100 (3,0)

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de la Saskatchewan

Tableau A5. Efficacités d'arrosage approximatives de divers systèmes d'irrigation

Méthode d'irrigation	Efficacité d'irrigation
Pivot central à basse	90 % et plus
Micro-irrigation ou goutte-à-	90 % et plus
Pivot central à haute pression	80 % et plus
Rampe mobile d'aspersion	70 % et plus
Canon arroseur	60 % et plus
Irrigation par gravité	60 % ou moins

Tableau A6. Profondeur d'application du pivot central (en pouces) basée sur un pivot couvrant 133 acres (efficacité de 100 %) (Tableau A3)

Durée d'un cycle (h)	Débit du système (Gal US par min.)							
	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
24	0,24	0,28	0,32	0,36	0,40	0,44	0,48	0,52
48	0,48	0,56	0,64	0,72	0,80	0,88	0,96	1,04
72	0,72	0,84	0,96	1,08	1,20	1,32	1,44	1,56
96	0,96	1,12	1,28	1,44	1,59	1,75	1,91	2,07

Tableau A7. Évapotranspiration quotidienne moyenne et périodes critiques de consommation d'eau (pouces/jour).

Culture	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Période critique
Blé	0,04	0,10	0,22	0,08	s.o.	Tallage et floraison
Orge	0,04	0,12	0,22	0,04	s.o.	Tallage et floraison
Canola	0,06	0,16	0,20	0,08	s.o.	Floraison et développement des gousses
Maïs ensilage	0,02	0,06	0,14	0,18	0,06	Apparition des panicules et remplissage des grains
Haricots secs	0,02	0,08	0,16	0,12	0,02	De la fin des boutons floraux à la formation des gousses
Pomme de terre	0,02	0,06	0,14	0,16	0,10	Initiation de la tubérisation et grossissement des tubercules
Féverole	0,02	0,08	0,22	0,16	0,02	Début floraison
Lin	0,04	0,10	0,22	0,10	s.o.	Floraison
Pois	0,04	0,08	0,20	0,08	s.o.	Début floraison

Ces valeurs estimatives sont basées sur les données de consommation quotidienne d'eau mesurées à Outlook (Sask.) de 2004 à 2015; les valeurs réelles peuvent varier de ± 20 %.

Tableau A8. Coefficients culturaux (Kc) de diverses cultures couramment irriguées (Source : FAO)

Culture	K _{Cini}	K _{Cmid}	K _{Cend}	Hauteur maximale de la culture (m)
Canola	0,35	1,15	0,35	0,6
Céréales	0,3	1,15	0,4	1,0
Maïs	0,3	1,2	0,6	2,0
Haricots secs	0,4	1,15	0,35	0,4
Pomme de terre	0,5	1,15	0,75	0,6
Soja	0,5	1,15	0,5	0,5 – 1,0

Tableau A9. Périodes critiques de besoins hydriques des cultures (Source : Gouvernement de la Saskatchewan, Centre de diversification des cultures irriguées, 2023).

Culture	Besoins hydriques saisonniers	Période critique de besoins hydriques	Fin de l'irrigation
Luzerne	400-500 mm	Après la coupe	Avant un gel meurtrier
Blé	300-400 mm	Tallage et floraison	Stade pâteux
Orge	250-350 mm	Du tallage à la floraison	Stade pâteux
Canola	350-450 mm	De la fin du stade végétatif ou de l'épiaison jusqu'à la floraison et au développement des gousses	Début de la maturation des graines
Lin	350-450 mm	Floraison	Avant la maturation des graines
Maïs	300-400 mm	Apparition des panicules et remplissage des grains	Stade denté
Pois	250-350 mm	Début de la floraison	Remplissage des gousses
Pomme de terre	300-400 mm	Initiation de la tubérisation et grossissement des tubercules	Début de la sénescence des tiges
Haricots secs	250-350 mm	De la fin des boutons floraux à la formation des gousses	Mi-août
Féverole	250-350 mm	Début de la floraison	Remplissage des gousses à 50 %

*** Les besoins hydriques sont basés sur des moyennes décennales et varient selon les conditions météorologiques locales et l'évapotranspiration potentielle.**

ANNEXE B : COURBES DE CONSOMMATION QUOTIDIENNE D'EAU DES CULTURES

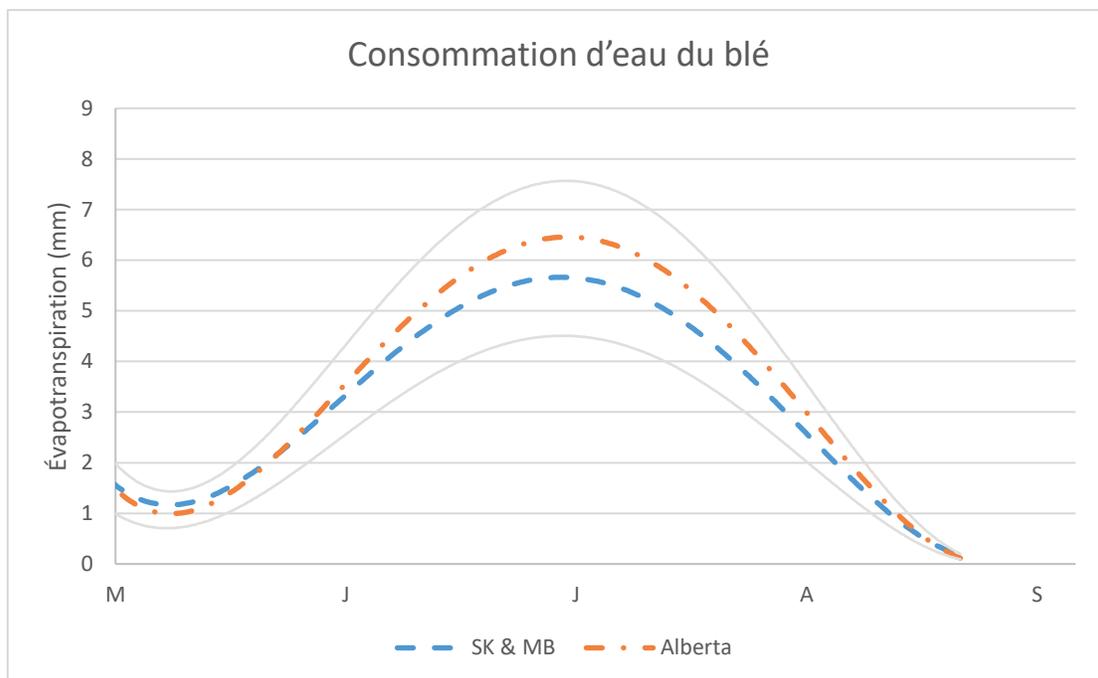


Figure B1. Consommation quotidienne d'eau du BLÉ selon les tendances dégagées à partir des données météorologiques et des coefficients culturaux, 2014-2023 (Outlook, Sask., Carberry, Man., Lethbridge, Alb.)

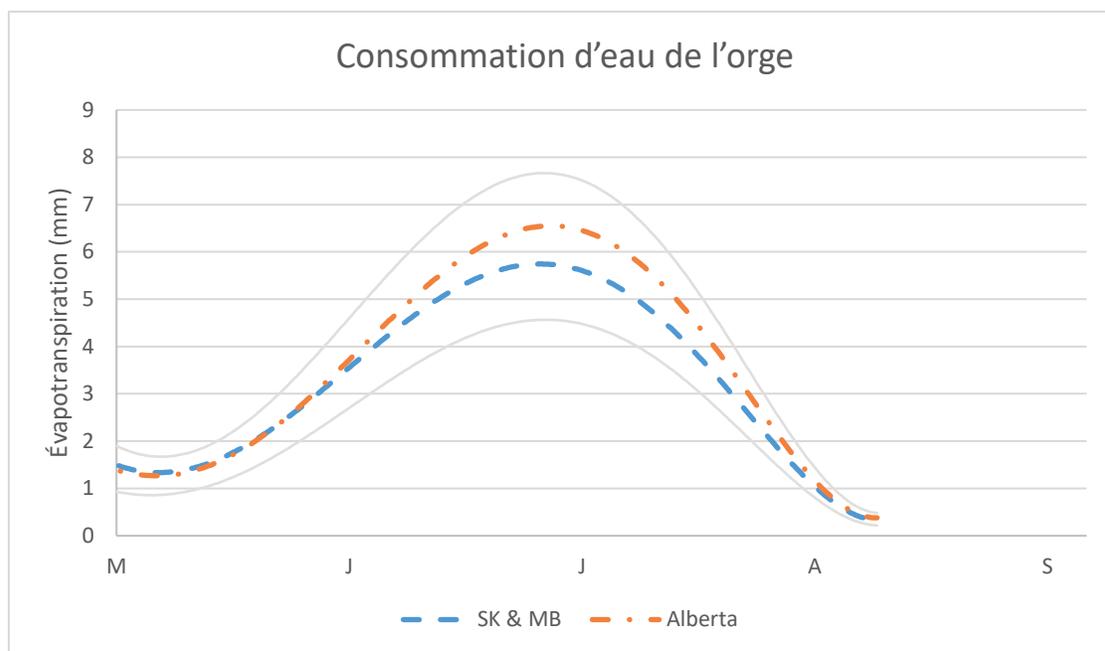


Figure B2. Consommation quotidienne d'eau de l'ORGE selon les tendances dégagées à partir des données météorologiques et des coefficients culturaux, 2014-2023 (Outlook, Sask., Carberry, Man., Lethbridge, Alb.)

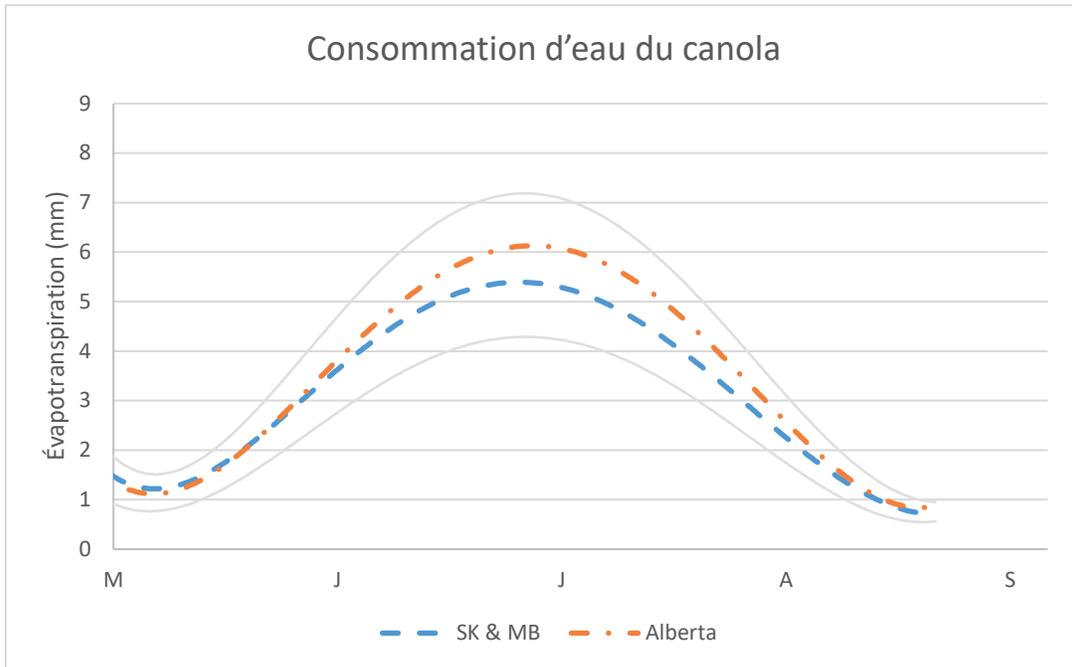


Figure B3. Consommation quotidienne d'eau du CANOLA selon les tendances dégagées à partir des données météorologiques et des coefficients culturaux, 2014-2023 (Outlook, Sask., Carberry, Man., Lethbridge, Alb.)

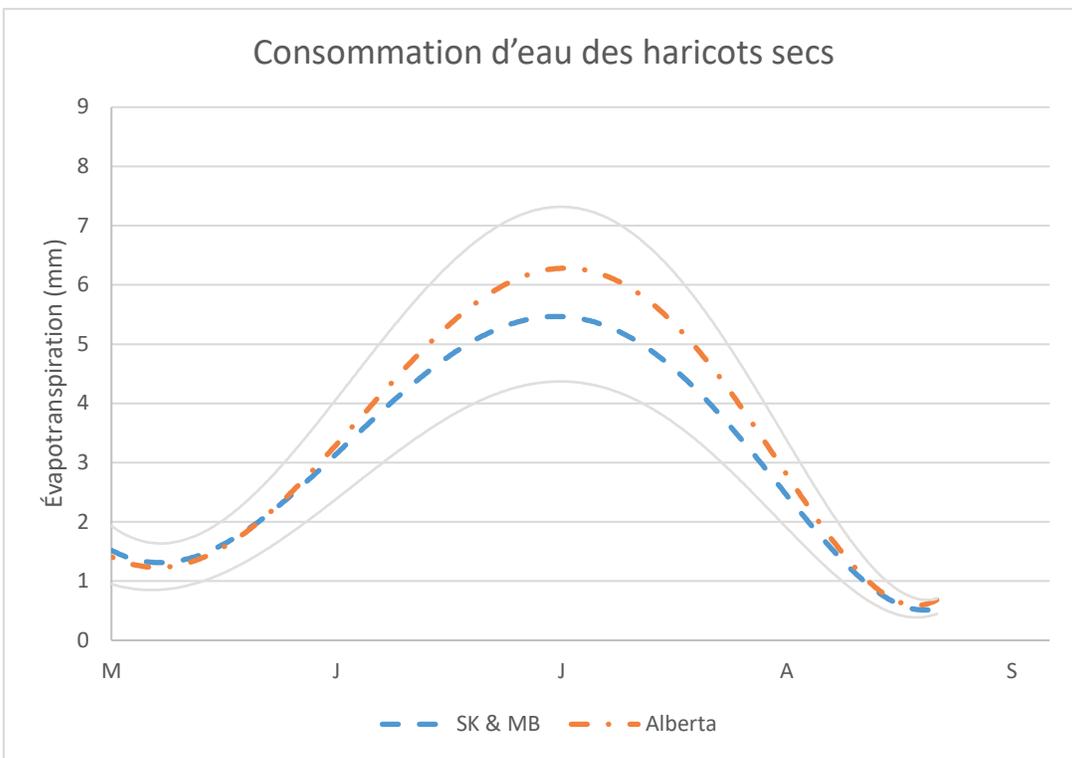


Figure B4. Consommation quotidienne d'eau des HARICOTS SECS selon les tendances dégagées à partir des données météorologiques et des coefficients culturaux, 2014-2023 (Outlook, Sask., Carberry, Man., Lethbridge, Alb.).

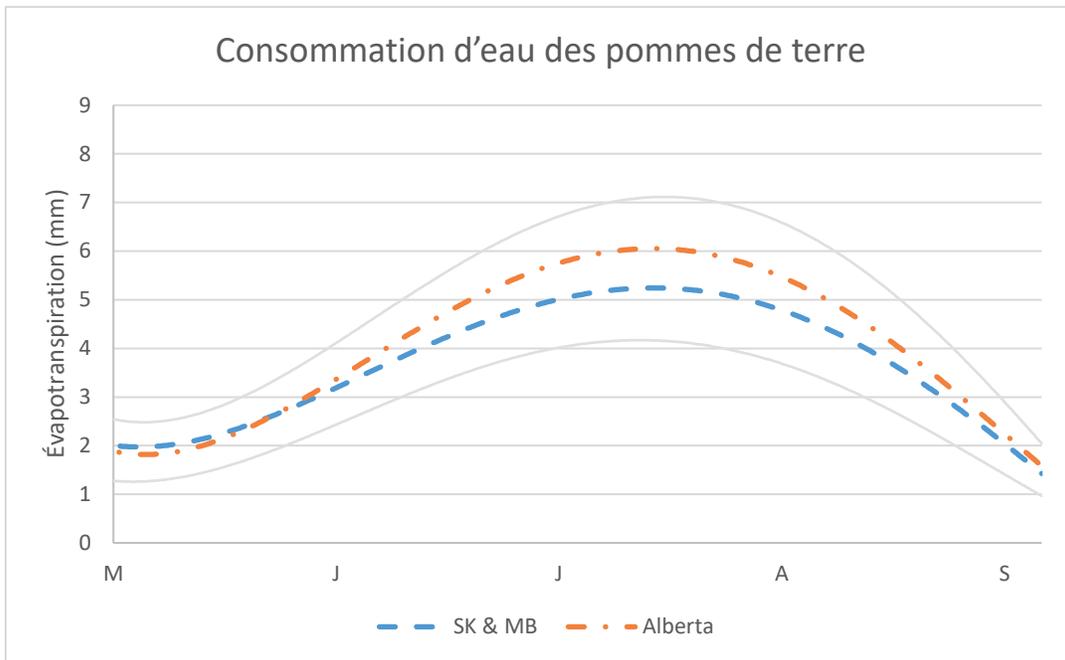


Figure B5. Consommation quotidienne d'eau des POMMES DE TERRE selon les tendances dégagées à partir des données météorologiques et des coefficients culturaux, 2014-2023 (Outlook, Sask., Carberry, Man., Lethbridge, Alb.)

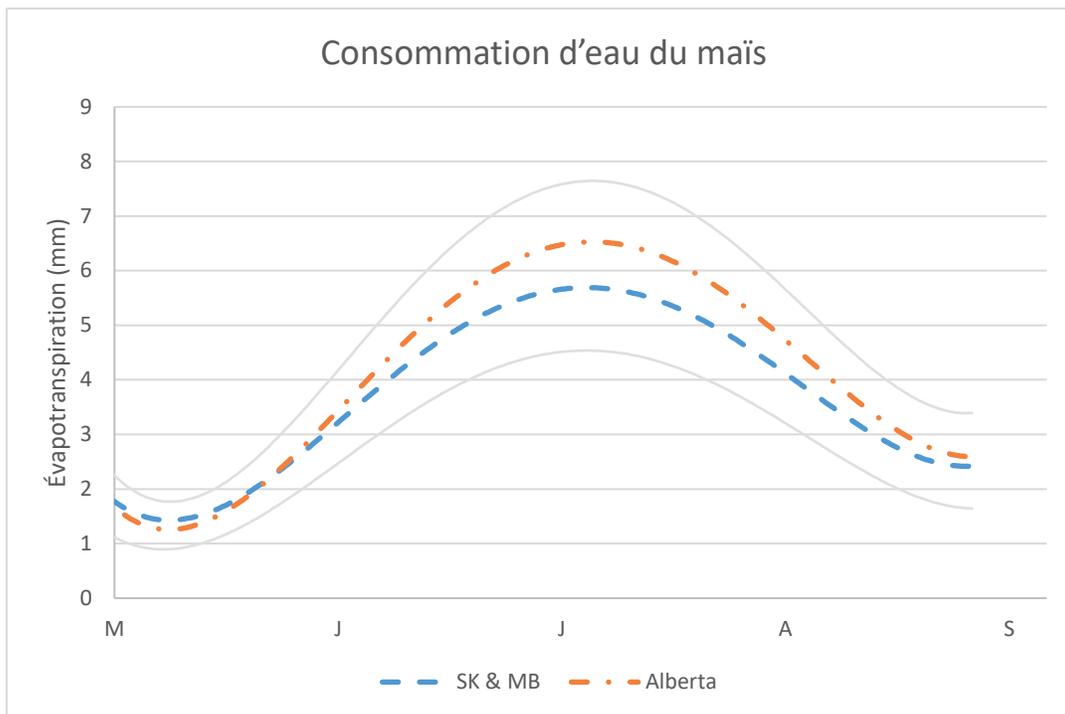


Figure B6. Consommation quotidienne d'eau du MAÏS selon les tendances dégagées à partir des données météorologiques et des coefficients culturaux, 2014-2023 (Outlook, Sask., Carberry, Man., Lethbridge, Alb.)

ANNEXE C : ÉQUATIONS

Équation 1 : rapport d'adsorption du sodium (RAS) de l'eau d'irrigation

$$SAR = \frac{0.275 (Na)}{\sqrt{(Ca) + 1.64(Mg)}}$$

où les concentrations de sodium (Na), de calcium (Ca) et de magnésium (Mg) sont exprimées en mg/L

Équation 2 : besoin de lessivage et eau appliquée

$$LR = \frac{EC_w}{5(EC_e) - EC_w}$$

où :

LR – besoin de lessivage pour le contrôle de la salinité du sol et son maintien dans la limite de tolérance de la culture EC_e

EC_w – conductivité électrique de l'eau d'irrigation appliquée (dS/M)

EC_e – coefficient de consommation d'eau spécifique à la culture

$$AW = \frac{ET}{1 - LR}$$

où :

AW – eau apportée en saison pour combler les besoins de lessivage (mm)

ET – évapotranspiration saisonnière du champ/de la culture (mm)

LR – besoin de lessivage pour le contrôle de la salinité du sol (calculé ci-dessus)

Équation 3 :

calcul des variations de l'humidité du sol = irrigation + précipitations – évapotranspiration

où :

Irrigation : quantité d'eau apportée, après la prise en compte de l'efficacité du système d'irrigation (Tableau A5 de l'annexe A, page 74).

Précipitations : mesurées à une station météorologique régionale ou avec un pluviomètre local.

Évapotranspiration : estimation de l'eau sortie du système par évaporation (à la surface du sol) et par transpiration de la culture, à l'aide de tableaux de consommation d'eau des cultures ou de calculs à partir de données météorologiques locales.

Équation 4 : calcul de l'évaporation

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

où :

ET_o – évapotranspiration de référence (mm/jour)
 R_n – rayonnement net à la surface de la culture (MJ/m²/jour)
 G – densité du flux thermique du sol (MJ/m²/jour¹)
 T – température moyenne quotidienne de l'air à 2 mètres (°C)
 u_2 – vitesse du vent à une hauteur de 2 mètres (m/s¹)
 e_s – pression de vapeur saturante (kPa)
 e_a – pression de vapeur réelle (kPa)
 Δ - pente de la courbe de pression de vapeur (kPa/°C¹)
 γ – constante psychrométrique (kPa/°C¹)

Équation 5 : ajustement de l'évapotranspiration de référence pour une culture spécifique

$$ET_c = ET_o * K_c$$

où :

ET_c – évapotranspiration spécifique à la culture (mm/jour)
 ET_o – évapotranspiration de référence (mm/jour)
 K_c – coefficient de consommation d'eau spécifique à la culture

Équation 6 : Calcul de l'indice de végétation par différence normalisée

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

où :

$NDVI$ – Indice de végétation par différence normalisée
 NIR – Valeur de réflectance dans le proche infrarouge
 R – Valeur de réflectance dans le rouge (visible)

Équation 7 : Calcul de la consommation d'eau de la culture avec l'indice NDVI

$$K_c = (1.37 * NDVI) - 0.086$$

où :

K_c – coefficient de consommation d'eau de la culture
 $NDVI$ – Indice de végétation par différence normalisée
 NIR – Valeur de réflectance dans le proche infrarouge

Équation 8 : calcul de l'indice de stress hydrique de la culture

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a)_M - (T_c - T_a)_{LL}}{(T_c - T_a)_{UL} - (T_c - T_a)_{LL}}$$

où :

T_c – Température du couvert végétal de la culture (°C)

T_a – Température de l'air au site de mesure dans le champ (°C)

$(T_c - T_a)_M$ – Gradient de température à l'emplacement mesuré (°C)

$(T_c - T_a)_{LL}$ – Gradient de température à la limite inférieure (aucun stress) (°C); peut remplacer la température du thermomètre mouillé T_{wb}

$(T_c - T_a)_{UL}$ – Gradient de température à la limite supérieure (stress maximal) (°C); peut remplacer la température maximale

Équation 9 : calcul de la durée d'irrigation goutte-à-goutte

$$T_z = \frac{S_e \times S_l \times D}{F \times E}$$

où :

T_z – durée d'irrigation par zone (h)

S_e – espacement des goutteurs le long des lignes latérales (m)

S_l – espacement latéral (m)

D – profondeur d'eau appliquée (mm)

F – débit de chaque goutteur (L/h)

E – efficacité d'application

L'équation X montre la durée d'irrigation par champ :

$$T_f = \frac{T_z \times n}{z}$$

où :

T_f – durée d'irrigation par champ (h)

T_z – durée d'irrigation par zone pour la profondeur d'irrigation souhaitée (h)

N – nombre total de zones dans le champ

Z – nombre de zones irriguées simultanément

ANNEXE D : EXEMPLE DE CALCULS POUR LA PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION

Exemple 1 : Perte de rendement lorsque l'alimentation hydrique est insuffisante pour maximiser le rendement

Une réduction de 20 % de l'alimentation hydrique nécessaire pour maximiser le rendement de l'orge peut se traduire par une perte de rendement d'environ 8 % (Figure 3, page 5).

Exemple 2 : Perte de rendement après la prise en compte du déficit d'irrigation et de l'efficacité du système d'irrigation

Pour maximiser le rendement des pommes de terre, il faut apporter 435 mm d'eau. En 2018, un irrigant a apporté 350 mm d'eau à ses pommes de terre, soit 80 % des besoins d'irrigation optimaux. De plus, comme l'efficacité de son système et de ses pratiques de gestion n'était que de 80 %, seulement 280 mm d'eau sont réellement parvenus à la culture, ce qui représente 64 % des besoins de la culture pour maximiser son rendement. Si l'efficacité du système avait été de 100 %, la réduction de rendement n'aurait été que de 6 %, le rendement n'aurait été réduit que de 6 % par rapport au niveau optimal. Cependant, les inefficacités du système coûtent plus qu'un 10 % de rendement additionnel, et la réduction globale de rendement est de 17,5 % (Figure 3, page 5).

Exemple 3 : Besoin de lessivage

Une culture de maïs est irriguée par un système d'irrigation à pivot central avec de l'eau provenant d'un ruisseau local dont la CE est de 1,2 dS/m. Sur la durée de la période de croissance, la culture du maïs devrait avoir un besoin hydrique saisonnier de 450 mm, et les précipitations reçues durant cette période ont été de 108 mm. En supposant que le système d'irrigation à pivot central a une efficacité d'application de 85 %, quelle quantité d'eau devez-vous apporter pour combler les besoins saisonniers d'eau pour le lessivage? (Équation 2 de l'annexe C, page 79).

Eau apportée pendant la saison = eau nécessaire ÷ efficacité du système

$$= 342 \text{ mm} \div 0,85$$

$$= 402 \text{ mm}$$

Besoin pour le lessivage = $\frac{EC_w}{5(EC_e) - EC_w}$ la CE_e du maïs est de 1,7 dS/m pour un rendement potentiel maximal (Tableau A2)

$$= \frac{1,2}{5(1,7) - 1,2}$$

$$= 0,16$$

Eau apportée = $\frac{ET}{1 - LR}$

$$= \frac{402 \text{ mm}}{1 - 0,16}$$

$$= 478 \text{ mm}$$

En tenant compte de la teneur en sels de l'eau et de l'efficacité d'application du système d'irrigation, vous devrez apporter près de 478 mm d'eau pour effectuer un lessivage adéquat des sels.

Exemple 4 : Dessèchement maximal permis

Un champ dont le sol est un loam limoneux a été planté en pommes de terre et la profondeur d'enracinement est de 45 centimètres (1,5 pied).

Si l'irrigation est déclenchée au dessèchement maximal permis fixé, combien d'eau faudra-t-il apporter pour ramener la zone racinaire à la capacité au champ?

Profondeur de la zone racinaire : 45 centimètres (1,5 pied)

Réserve en eau utile = capacité au champ – point de flétrissement permanent (Figure A2 de l'annexe A, page XX)

$$= 2,6 \text{ pouces d'eau/pied} - 1,2 \text{ pouce/pied} = 1,4 \text{ pouce/pied}$$

Dessèchement maximal permis ~ 50 % de la réserve en eau utile

$$= 1,4 \text{ pouce/pied} \times 50 \% = 0,7 \text{ pouce/pied}$$

Dessèchement maximal permis

$$= 0,7 \text{ pouce/pied} \times 1,5 \text{ -pied de zone racinaire} = 1,1 \text{ pouce (28 mm) d'eau}$$

1,1 pouce (28 millimètres) d'eau à apporter pour ramener la zone racinaire jusqu'à la capacité au champ

Exemple 5 : Profondeur nette de l'eau apportée dans un champ sur une période de 48 heures

À la mi-juin, le canola utilise environ 0,16 pouce (4 millimètres) d'eau par jour (Tableau A7 de l'annexe A) Lorsqu'un pivot d'irrigation à haute pression de 900 gallons américains/minute est utilisé (Tableau A5 de l'annexe A), quelle est la profondeur nette de l'eau apportée dans un champ sur une période de 48 heures (Tableau A4 de l'annexe A)?

Profondeur de l'eau apportée en 48 heures = 0,72 pouce x 0,8 = 0,58 pouce (14,7 millimètres)

Consommation de la culture pendant 24 heures = 0,16 pouce (4 millimètres)

Consommation de la culture pendant 48 heures = 0,32 pouce (8 millimètres)

Eau nette retenue dans le champ = 0,58 pouce – 0,32 pouce = 0,26 pouce (6,6 millimètres)

Exemple 6 : Économie potentielle d'eau si le système d'irrigation est converti en un système plus efficace

Si un système d'irrigation à pivot central à haute pression était converti en un système à basse pression, quelle quantité d'eau serait économisée sur un cycle de 48 heures (Tableau A5 de l'annexe A) si le débit du système est de 900 gallons américains par minute [gal US/min]?

Profondeur d'application de l'eau en 48 heures (Tableau A6 de l'annexe A) = 0,72 pouce (18,2 mm)
(efficacité de 100 %)

Profondeur d'application de l'eau – pivot central à haute pression (Tableau A5 de l'annexe A) =
0,72 pouce x 80 %/100 % = 0,58 pouce (14,7 mm)

Profondeur d'application de l'eau – pivot central à basse pression (Tableau A5 de l'annexe A) =
0,72 pouce x 90 %/100 % = 0,65 pouce (16,5 mm)

Économie nette d'eau = 0,65 pouce – 0,58 pouce = 0,07 pouce (1,8 millimètre)

Exemple 7 : Profondeur d'irrigation nécessaire pour ramener la zone racinaire à la capacité au champ

Des échantillons de sol ont été prélevés dans un champ et la texture du sol est un loam sableux. La profondeur d'enracinement était de 15 cm. Le système d'irrigation est un pivot central à haute pression.

A. Calculez l'humidité pondérale ou gravimétrique (% d'eau par POIDS)

$$\% \text{ d'eau par poids} = \frac{\text{poids échantillon humide} - \text{poids échantillon sec}}{\text{poids échantillon sec}} \times 100\%$$

Poids du contenant = 50 grammes (à prendre en compte lors des pesées)

Poids de l'échantillon de sol humide = 153,4 grammes – 50 grammes = 113,4 grammes

Poids de l'échantillon de sol sec = 151,1 grammes – 50 grammes = 101,1 grammes

$$\% \text{ d'eau par poids} = \frac{113,4 \text{ grammes} - 101,1 \text{ grammes}}{101,1 \text{ grammes}} \times 100 \% = 12,2\%$$

B. Convertissez l'humidité pondérale ou gravimétrique en humidité volumique (% d'eau par VOLUME)

$$\% \text{ d'eau par volume} = \% \text{ eau par poids} * \frac{\text{masse volumique apparente du sol}}{\text{masse volumique apparente de l'eau}} * 100 \%$$

Masse volumique apparente de l'eau = ~ 1,0 gramme/centimètre³

$$\text{Masse volumique apparente du sol} = \frac{\text{poids d'échantillon sec}}{\text{Volume d'échantillon de sol}}$$

$$\text{Volume de l'échantillon de sol} = \pi * \text{rayon}^2 * \text{longueur}$$

Rayon de la carotte de sol = diamètre de la carotte de sol/2 = 2,54 centimètres/2 = 1,27 centimètre

Longueur de la carotte de sol = 15 centimètres

$$\text{Masse volumique apparente du sol} = \frac{101,1 \text{ grams}}{\pi * (1,27 \text{ centimètre})^2 * 15 \text{ centimètres}} = 1,33 \text{ gramme/centimètre}^3$$

(= loam limoneux)

$$\% \text{ d'eau par volume} = 12,2 \% * \frac{1,33 \frac{\text{gramme}}{\text{centimètre}^3}}{1,0 \frac{\text{gramme}}{\text{centimètre}^3}} * 100 \% = 16,2 \%$$

Exemple 7 : Suite

C. Calculez la profondeur d'irrigation nécessaire pour ramener le sol à la capacité au champ

Profondeur d'irrigation = (capacité au champ – teneur en humidité du sol) x profondeur des racines

Capacité au champ du loam limoneux (Tableau A3 de l'annexe A, page 73) = eau disponible + eau non disponible

$$= (1,2 + 1,4 \text{ pouce d'eau / pied de profondeur de sol} = 2,6 \text{ pouces d'eau / pied de profondeur de sol})$$

Teneur en humidité du sol = 16,2 % x 12 pouces/pied de profondeur de sol = 1,9 pouce d'eau / pied de profondeur de sol ≤ dessèchement maximal permis* → **irrigation nécessaire**)

*Dessèchement maximal permis = eau disponible à la capacité au champ/2 + point de flétrissement permanent [Figure A2 de l'annexe A (loam limoneux), page 72]

$$= (1,4/2 + 1,2) \text{ pouces d'eau/pied de profondeur de sol} = 1,9 \text{ pouce d'eau/pied de profondeur de sol}$$

$$\text{Profondeur d'irrigation} = [2,6 - 1,9] \text{ pouce d'eau/pied de profondeur de sol} * 1\text{-pied de zone racinaire} = \mathbf{0,7 \text{ pouce d'eau}}$$

D. Calculez la profondeur d'irrigation nécessaire en prenant en compte l'efficacité du système

L'efficacité du système d'irrigation à pivot central à haute pression est de 80 % (Tableau A5 de l'annexe A)

Profondeur d'irrigation = ((capacité au champ – teneur en humidité du sol) x profondeur des racines) / efficacité d'irrigation

$$= \frac{(2,6 - 1,9) \text{ inches of water/foot of soil} * 1 \text{ foot root depth}}{80/100} = 0.875 \text{ inches of water}$$

Une profondeur d'irrigation de 0,875 pouce d'eau est nécessaire pour ramener la zone racinaire à la capacité au champ.

Exemple 8 : Profondeur d'irrigation nécessaire selon la méthode d'évaluation qualitative au toucher

Des échantillons ont été prélevés dans un champ dont le sol est un loam sableux. Les échantillons de sol ont été prélevés à une profondeur de deux pieds. Les échantillons ont été divisés en deux sous-échantillons : 0–1 pied et 1–2 pieds. Selon la texture et en se référant au tableau 1, la réserve en eau utile a été estimée à :

0–1 pied : 25–50 % de la réserve en eau utile (estimation de 40 %) (*sous le dessèche maximal permis → Irriguez*)

1–2 pieds : 50–75 % de la réserve en eau utile (estimation de 60 %)

Le loam sableux a 1,2 pouce de réserve en eau utile /pied de sol à la capacité au champ (Figure A2 de l'annexe A, page 72). Pour ramener la zone racinaire à la capacité au champ, nous devons irriguer :

0–1 pied : $(100 - 40 \%) * 1,2 \text{ pouce d'eau/pied de profondeur de sol} = 0,72 \text{ pouce d'eau}$

1–2 pieds : $(100 - 60 \%) * 1,2 \text{ pouce d'eau/pied de sol} = 0,48 \text{ pouce d'eau}$

Total de l'eau à apporter pour ramener le champ à la capacité au champ = $0,72 + 0,48 \text{ pouce d'eau}$

= 1,2 pouce d'eau

Exemple 9 : Profondeur d'irrigation nécessaire selon la méthode du pédohygromètre ou du tensiomètre

Des pédohygromètres, placés à deux profondeurs (6 po et 12 po) dans un loam sableux, détectent des potentiels hydriques du sol de 6 et de 2 bars respectivement. D'après la figure 17 (page 31), l'eau disponible pour les plantes est de

0-6 pouces de profondeur : 6 bars = 15 % de la réserve en eau utile

6-12 pouces de profondeur : 1 bar = 50 % de la réserve en eau utile

Le loam sableux a un niveau maximal de réserve en eau utile de 1,2 pouce d'eau / pied de profondeur de sol (Figure A2 de l'annexe A, page XX) à la capacité au champ. Pour ramener la zone racinaire à la capacité au champ, nous devons irriguer :

0–0,5 pied : $(100 - 15 \%) / 100 \% * 1,2 \text{ pouce d'eau/pied de profondeur de sol} * 0,5 \text{ pied} = 0,5 \text{ pouce d'eau}$

0,5 –1,0 pied : $(100 - 50 \%) / 100 \% * 1,2 \text{ pouce d'eau/pied de profondeur de sol} * 0,5 \text{ pied} = 0,3 \text{ pouce d'eau}$

Eau d'irrigation totale nécessaire = $0,5 \text{ pouce} + 0,3 \text{ pouce} = \mathbf{0,8 \text{ pouce d'eau}}$

Exemple 10 : Profondeur d'irrigation nécessaire selon la méthode des sondes TDR ou capacitatives

Une sonde capacitative est placée dans un loam sableux avec un seul capteur à 15 centimètres (6 pouces). Au stade phénologique actuel de la culture, la zone racinaire a une profondeur d'environ 20 centimètres (8 pouces). Le loam sableux a une capacité au champ de 18,3 % (2,2 pouces d'eau / 12 pouces de profondeur de sol) et un point de flétrissement permanent de 8,3 % (1,0 pouce d'eau / 12 pouces de profondeur de sol (Figure A2 de l'annexe A, page 72).

L'humidité actuelle du sol est de 12 %. a) Devriez-vous irriguer? B) Si oui, combien d'eau devriez-vous apporter?

- a) Le seuil de déclenchement de l'irrigation est fixé à 50 % de la réserve en eau utile (c.-à-d. le dessèchement maximal permis)
- $$= [(capacité\ au\ champ - point\ de\ flétrissement\ permanent)/2 + point\ de\ flétrissement\ permanent]$$
- $$= [(18,3\ \% - 8,3\ \%)/2 + 8,3\ \%] = 13,3\ \%$$

L'humidité actuelle du sol (12 %) est en dessous de 50 % de la réserve en eau utile (13,3 %)

→ **Irriguez**

- b) Pour ramener la zone racinaire à la capacité au champ

Profondeur d'irrigation = $[(capacité\ au\ champ - humidité\ actuelle\ du\ sol)/100\ \%] \times$ profondeur des racines

$$= (18,3\ \% - 12\ \%)/100\ \% \times 8\ pouces$$

$$= \mathbf{0,5\ pouce\ d'eau}$$

Exemple 11 : Exemple de comptabilisation du bilan hydrique pour la programmation de l'irrigation d'un champ de canola sur sol loameux

Capacité au champ = 2,4 pouces d'eau/pied de profondeur de sol (Figure A2 de l'annexe A, page 72)

Point de flétrissement permanent = 1,0 pouce d'eau / pied de profondeur de sol

Dessèchement maximal permis (50 % de a réserve en eau utile = seuil de déclenchement de l'irrigation)
 = (2,4 – 1,0)/2 + 1,0 = 1,7 pouce d'eau/pied de profondeur de sol

Date	Teneur initiale en eau du sol*	Consommation d'eau de la culture*,† (ET)	Irrigation/précipitations*	Teneur finale en eau du sol*
28 juillet	2,0	0,2	0	1,8
29 juillet	1,8	0,2	0	1,6
30 juillet	1,6	0,2	0,5	1,9
31 juillet	1,9	0,2	0	1,7
1 ^{er} août	1,7	0,1	1,0	2,6
2 ^{er} août	2,4 †	0,1	0	2,3
3 août	2,3	0,1	0	2,2

*Toutes les valeurs sont exprimées en pouces

†Estimation de la consommation quotidienne d'eau de la culture (Tableau A7 de l'annexe A, page 74)

‡La capacité au champ est de 2,4 pouces d'eau/pied de sol; le 0,2 pouce d'eau excédentaire appliqué la veille s'est drainé par gravité

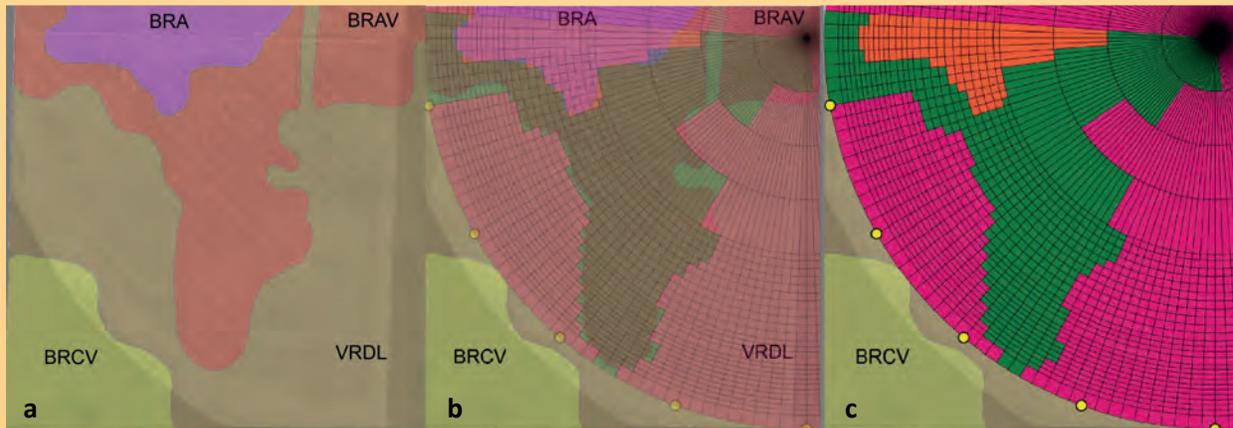
Exemple 12 : Au début de juillet, une culture de blé a besoin de 5,5 mm d'eau par jour pour compenser l'eau perdue par évapotranspiration. Dans un champ comportant 21 zones, dans lequel sept zones sont irriguées simultanément, combien de temps par jour le système doit-il fonctionner pour apporter cette eau nécessaire? Le système a un espacement de 0,6 m entre les goutteurs et les lignes latérales sont placées à 1,0 m. La dimension de chaque goutteur permet un débit d'eau de 1,0 L/h. En supposant une efficacité du système de 95 % (Tableau A5)

$$\begin{aligned}
 T_z &= (0,6 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 5,5 \text{ mm}) / (1,0 \text{ L/h} \times 0,95) \\
 &= (3,3 \text{ L}) / (0,95 \text{ L/h}) \\
 &= 3,47 \text{ h}
 \end{aligned}$$

$$T_f = 3,47 \text{ h} \times 21 \text{ zones} / 7 \text{ zones irriguées simultanément} = 10,4 \text{ h}$$

Remarque : 1 litre = 0,001 m³

Exemple 13 : Cartographie des zones d'IDV à l'aide d'une carte pédologique existante

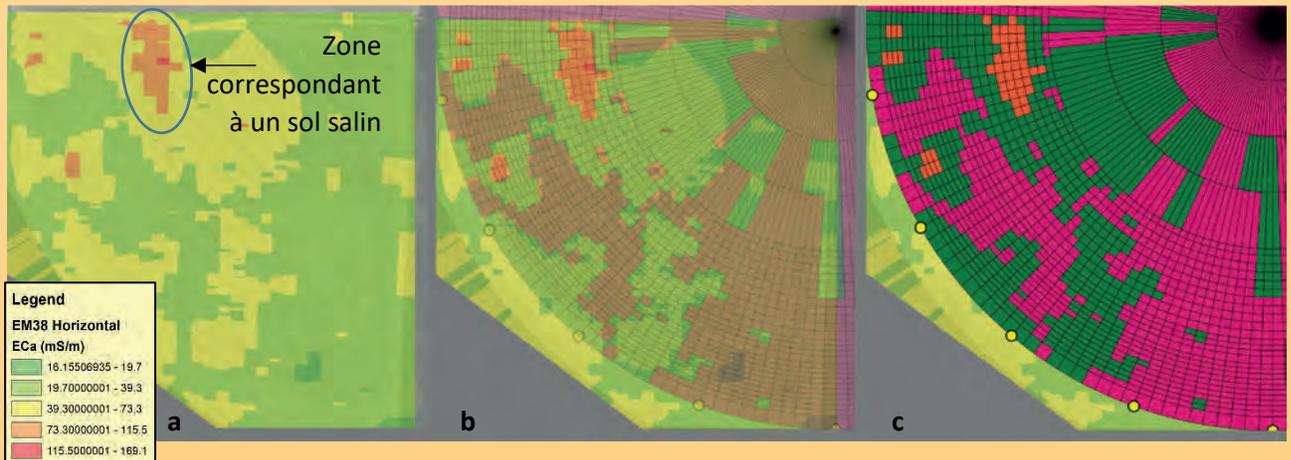


Les cartes pédologiques existantes (a) délimitent une région en zones selon des associations de sols uniques qui portent des noms uniques (généralement identifiés par des abréviations). Chaque association de sol possède des caractéristiques pédologiques uniques, notamment en ce qui a trait à la texture du sol. Les classes de sol ont été définies et délimitées après le prélèvement d'un nombre limité d'échantillons de sol dans la région. Par conséquent, ces cartes pédologiques de résolution grossière n'ont pas été dressées pour une utilisation à l'échelle du champ.

Dans cet exemple, la partie de champ étudiée présente trois associations de sols uniques sous le pivot d'irrigation (b) :

- BRA (VERT) – sol brun foncé ortique de Bradwell – loam
- BRAV (ORANGE) – Bradwell/Vera – loam avec du sable, dunes basses
- VRDL (ROSE) – régosol ortique de Vera – sable, dunes basses, avec substrat de till

Exemple 14 : Cartographie de zones d'IDV à l'aide d'une carte de conductivité électrique apparente

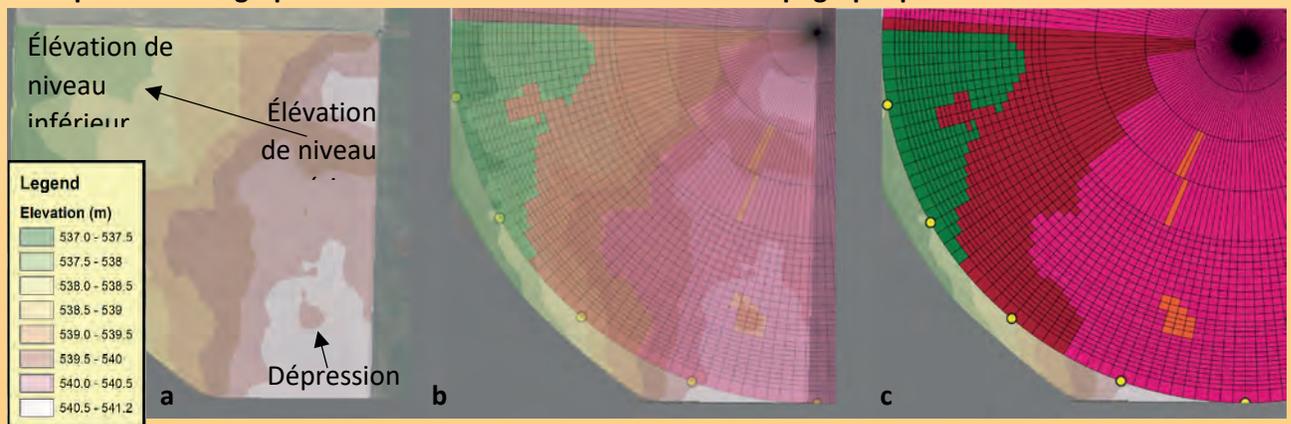


On a mesuré un champ à l'aide d'un appareil Geonics EM38 (a, b). La conductivité électrique (CE) a varié entre 16–170 milliSiemens/mètre (mS/m). On a divisé le champ en trois zones sur la base de ces données (c) :

Zone 1 (en **VERT**) : 16–39 mS/m Zone 2 (en **ROSE**) : 39–73 mS/m Zone 3 (en **ORANGE**) : + de 73 mS/m

Le propriétaire foncier a indiqué que la zone 3 correspondait à une zone de sol salin et à quelques dépressions où l'eau s'accumule. Pour améliorer la productivité de cette zone, le producteur pourrait utiliser une combinaison de drainage et d'irrigation de précision (c.-à-d. pour abaisser la valeur de la CE).

Exemple 15 : Cartographie de zones d'IDV à l'aide d'un relevé topographique



Les niveaux d'élévation d'un relevé topographique varient de 538 à 541 m (a, b). Sur la base de ces données, on a divisé le champ en quatre zones (c) :

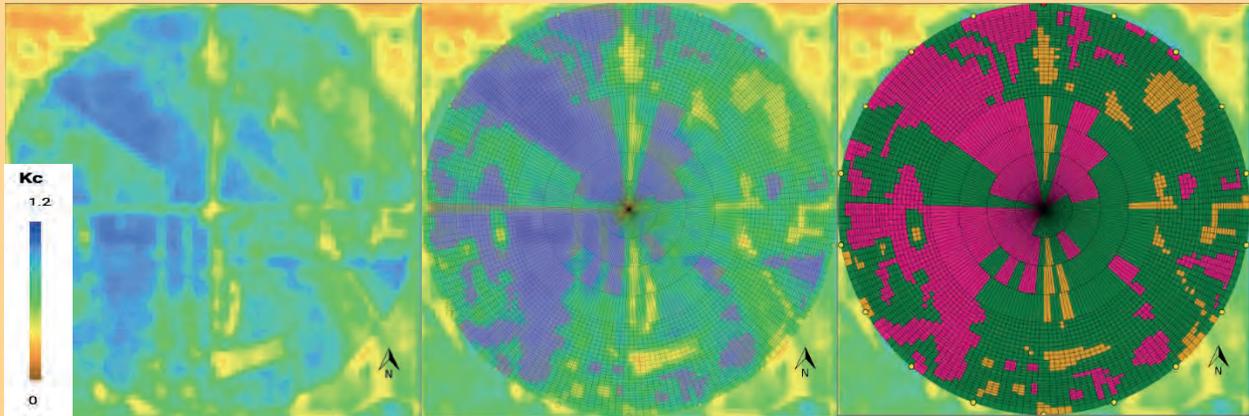
Zone 1 : 537–538 mètres (élévation de niveau inférieur en **VERT**)

Zone 2 : 538–539, 5 mètres (mi-pente en **ROUGE**)

Zone 3 : 539,5 –541 mètres (élévation de niveau supérieur en **ROSE**)

Zone 4 : dépressions (fondrières en **ORANGE**) – limitez l'irrigation dans ces zones

Exemple 16 : Cartographie et planification de l'irrigation de zones d'IDV à l'aide d'images NDVI



À l'aide d'images d'indices de végétation par différence normalisée (NDVI), préparez un plan d'irrigation dynamique pour le prochain arrosage.

Étape 1. Convertissez les valeurs des indices de NDVI en coefficients de consommation d'eau de la culture (K_c) [conversion automatisée dans certains systèmes, p. ex. Irrican] – Équation 7 de l'annexe C, page 80

Étape 2. Divisez le champ en zones distinctes sur la base de plages de consommation d'eau de la culture

Zone 1 : consommation élevée (en bleu), $K_c > 1$ (moyenne = 1,1)

Zone 2 : consommation modérée (en vert), $1 > K_c > 0,5$ (moyenne = 0,75)

Zone 3 : consommation faible (en jaune), $K_c < 0,5$ (moyenne = 0,4)

Étape 3. Calculez la quantité d'eau d'irrigation nécessaire pour combler les besoins hydriques de la culture.

Évapotranspiration estimée (ET_o) depuis le dernier arrosage ou la dernière pluie pour la zone de la culture de référence (graminée ou luzerne) = 0,75 pouce d'eau (p. ex., donnée publiée par le ministère de l'Agriculture de la Saskatchewan, tiré du manuel AIMM [modèle de gestion de l'eau d'irrigation de l'Alberta])

Utilisez l'équation 3 ($ET_o \times K_c =$ consommation d'eau) pour calculer les besoins hydriques de la culture dans chaque zone

Zone 1 : 0,75 pouce d'eau \times 1,1 = 0,825 pouce \rightarrow **0,8 pouce d'eau**

Zone 2 : 0,75 pouce d'eau \times 0,75 = 0,56 pouce \rightarrow **0,6 pouce d'eau**

Zone 3 : 0,75 pouce d'eau \times 0,4 = 0,3 pouce \rightarrow **0,3 pouce d'eau**

Exemple 17 : Programmation de la dernière irrigation

Quelle quantité minimale d'eau d'irrigation doit être apportée pour soutenir une culture de blé jusqu'à sa pleine maturité?

Culture : Blé

Stade phénologique de la culture : Fin du stade laiteux (Tableau A9 de l'annexe A, page 75)

Consommation quotidienne d'eau de la culture (Tableau A7 de l'annexe A, page 74 pour août) : 0,08 pouce d'eau/jour

Profondeur des racines (Tableau A4 de l'annexe A, page 73) : 3 pieds

Date prévue d'atteinte de la maturité : dans 12 jours

Sol : loam sableux

Eau disponible pour les plantes (loam sableux) à la capacité au champ (Figure A2 de l'annexe A, page 72) : 1,2 pouce d'eau / pied de profondeur de sol

État hydrique actuel du sol : 14 % (humidité volumique)

Teneur en eau du sol actuelle : humidité volumique x 12 pouces d'eau/pied de profondeur de sol

$$= 14 \% \times 12 \text{ pouces d'eau/pied de profondeur de sol} = (0,14 \times 12) \text{ pouces d'eau/pied de profondeur de sol} \\ = 1,68 \text{ pouce d'eau / pied de profondeur de sol}$$

Dessèchement maximal permis (Figure A2 de l'annexe A, page XX) : Eau non disponible totale + (eau disponible totale/2)

$$= (1,00 + 1,20/2) \text{ pouces d'eau/pied de profondeur de sol} = 1,60 \text{ pouce d'eau/pied de profondeur de sol}$$

Eau disponible au-dessus du dessèchement maximal permis : teneur en eau du sol actuelle - dessèchement maximal permis

$$= (1,68 - 1,60) \text{ pouce d'eau/pied de profondeur de sol} = 0,08 \text{ pouce d'eau/pied de profondeur de sol}$$

Total de l'eau disponible dans le sol (profondeur des racines) au-dessus du dessèchement maximal permis : teneur en eau du sol x profondeur des racines

$$= 0,08 \text{ pouce d'eau/pied de profondeur du sol} \times 3 \text{ pieds} = 0,24 \text{ pouce d'eau}$$

Besoins hydriques de la culture jusqu'à sa maturité : consommation quotidienne d'eau de la culture X jours
(0,08 pouce d'eau/jour x 12 jours = 0,96 pouce d'eau)

Irrigation nécessaire : Besoins hydriques de la culture jusqu'à sa maturité – eau disponible dans le sol

$$(0,96 - 0,24) \text{ pouce d'eau} = 0,72 \text{ pouce d'eau} \approx 0,75 \text{ pouce d'eau}$$

→ 0,75 pouce d'eau doit être apporté pour soutenir la culture jusqu'à sa maturité



MANUEL DE PROGRAMMATION DE L'IRRIGATION POUR LES PRAIRIES

