Outils agrométéorologiques pour la planification de l'irrigation des cultures

Auteurs : Steeve Pepin, Ph.D., professeur-chercheur
Université Laval, Québec
Gaétan Bourgeois, chercheur scientifique
Agriculture et Agroalimentaire Canada, Bioclimatologie et modélisation
Saint-Jean-sur-Richelieu

L'évaluation, à l'aide de mesures réelles ou par modélisation, des pertes d'eau provenant des cultures, vergers à graines et à fruits a fait l'objet de nombreux travaux de recherche au cours des dernières décennies. Que ce soit pour concevoir un système d'irrigation ou de ponceaux, pour combler les besoins en eau des productions agricole, horticole et forestière, ou pour gérer et utiliser de façon raisonnée les ressources hydriques et le territoire, cette information est importante pour le producteur. Une conduite optimale de l'irrigation visant à satisfaire adéquatement les besoins en eau des cultures est l'un des éléments incontournables d'une agriculture durable. Le défi s'avère toutefois de taille, en particulier dans le contexte actuel de climat variable et en évolution.

Plusieurs méthodes de planification de l'irrigation sont disponibles et varient en complexité, soit de la simple perception d'un besoin en eau jusqu'à l'utilisation de modèles dynamiques de bilan hydrique du sol, combinée avec l'utilisation de mesures directes de l'humidité du sol (Simonne *et al.*, 2011). Au cœur de toutes ces méthodes qui utilisent les données météorologiques pour la planification de l'irrigation, on retrouve le concept de l'évapotranspiration. Cette présentation vise à mieux comprendre les éléments requis pour prédire l'évapotranspiration et à explorer le potentiel des modèles de bilan hydrique du sol.

APPROCHES BASÉES SUR L'ÉVAPOTRANSPIRATION

L'évapotranspiration (ET) est la quantité de vapeur d'eau transférée dans l'atmosphère par transpiration des plantes et par évaporation au niveau du sol, de surfaces d'eau libre et autres surfaces interceptant la pluie. On définit l'évapotranspiration potentielle (ETP) comme étant la valeur maximale d'évapotranspiration d'un couvert végétal continu lorsqu'il y a suffisamment d'eau disponible dans le sol pour satisfaire la demande évaporative de l'atmosphère. L'ETP dépend essentiellement des apports énergétiques et est indépendante des caractéristiques de la surface. L'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à la perte en eau effective d'un couvert végétal, soit la somme des quantités évaporée et transpirée, en tenant compte des diverses résistances au mouvement de l'eau (sol–plantes) et à la diffusion de la vapeur d'eau (feuilles–atmosphère). En général, la demande atmosphérique (ETP) est supérieure à l'offre (ETR) : la réduction de l'évapotranspiration sous le taux potentiel étant attribuable à la fermeture partielle des stomates et/ou à l'assèchement de la surface du sol. Durant l'été, une culture bien irriguée peut perdre de 2 à 5 mm en hauteur d'eau par jour.

Puisque l'évapotranspiration réelle de plusieurs types de couverts végétaux représente une valeur relativement constante de l'ETP, on peut estimer l'évapotranspiration à partir de l'équation de Penman et utiliser un facteur de correction approprié pour l'espèce étudiée (normalement compris entre 0,6 et 0,8 pour les climats tempérés). Le coefficient de correction peut être plus petit si le couvert végétal ne couvre pas complètement le sol. Ce coefficient est préférablement remplacé par une conductance de la surface au transfert de vapeur d'eau appelée la conductance du couvert (g_c) qui dépend, entre autres, de la conductance stomatique (g_s) moyenne des feuilles. L'ajout, dans l'équation de Penman, d'une conductance du couvert qui représente le « *contrôle physiologique* » exercé par les plantes sur l'évaporation conduit à l'équation de Penman-Monteith. Une des formes courantes de l'équation de Penman-Monteith est :

$$E_c = \frac{s(R_n - G) + \rho_a c_h g_a D/P_a}{\lambda\left[s + \gamma\left(1 + (g_a/g_c)\right)\right]} \qquad \text{(Éq. 1)}$$

où E_c est l'évapotranspiration du couvert (mol m^{-2} s^{-1}), s est la pente (en Pa °C^{-1}) de la relation entre la température et la pression de vapeur d'eau à saturation, R_n est le rayonnement net au-dessus du couvert (W m^{-2}), G est la chaleur accumulée dans le couvert (W m^{-2}), ρ_a est la densité de l'air (1204 kg m^{-3}), c_h est la capacité de chaleur de l'air (29,3 J mol^{-1}), g_a est la conductance aérodynamique (mol m^{-2} s^{-1}), g_c est la conductance du couvert (mol m^{-2} s^{-1}), D est le déficit de saturation de l'air (en Pa), P_a est la pression atmosphérique et λ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau (44 kJ mol^{-1}). Il est à noter que G est ~0 pour des pas de temps de 24 heures.

Cette équation de Penman-Monteith permet d'estimer la transpiration du couvert entier sur une base quotidienne, hebdomadaire ou mensuelle. Les variables environnementales requises sont la température et l'humidité de l'air, le rayonnement solaire et la vitesse du vent au-dessus du couvert. Lorsque l'évapotranspiration d'une culture doit être estimée sur de longs intervalles de temps, il est souhaitable d'utiliser des données météorologiques quotidiennes (ou horaires) et de faire la somme des volumes d'eau évaporée et transpirée quotidiennement plutôt que d'utiliser des moyennes hebdomadaires ou mensuelles du rayonnement solaire, de la vitesse du vent, de la température et de l'humidité de l'air (Campbell et Norman, 1998). L'équation de Penman-Monteith est de plus en plus utilisée pour gérer l'irrigation en agriculture et elle est très utile, entre autres, pour examiner l'influence des variables environnementales et des caractéristiques du couvert sur l'évapotranspiration.

Il est nécessaire d'évaluer les besoins en eau d'une culture afin de déterminer les volumes d'eau à apporter par irrigation au cours de la saison de croissance (en tenant compte des précipitations et de la réserve en eau du sol). L'évapotranspiration potentielle (ETP), qui est essentiellement une fonction de la demande évaporative de l'atmosphère, permet d'estimer la demande en eau des cultures. L'ETP d'une culture de référence (ET_o) a été mise en place dans les années 1970 pour éliminer la nécessité de calibrer une équation d'ET spécifique à chaque culture, stade cultural et zone géographique (c.-à-d. calage local; Pereira *et al.*, 2006). L'évapotranspiration de référence correspond à l'ET de la végétation au-dessus de laquelle les variables climatiques ont été mesurées, de façon à bien représenter les processus physiques et biologiques dans le bilan énergétique d'un couvert végétal. La FAO a adopté un couvert de gazon comme culture de référence, d'une hauteur variant entre 8 et 15 cm et dont la conductance au transfert de vapeur d'eau se situe autour de 0,014 m s^{-1}, ces paramètres fournissant des valeurs acceptables d'ET_o dans la plupart des zones et

conditions climatiques (Lascano, 2007). Selon Allen *et al*. (1998), l'évapotranspiration de référence est définie comme le flux d'ET d'une culture hypothétique de référence, d'une hauteur supposée de 0,12 m, d'une résistance de surface au transfert de vapeur d'eau de 70 s m^{-1} et ayant un albédo de 0,23, très proche de l'ET d'une grande surface de gazon de hauteur uniforme, en croissance active, avec un approvisionnement en eau convenable. L'approche de Penman-Monteith (PM) a été choisie par la FAO comme méthode privilégiée d'estimation de l'ET_o du gazon et des coefficients culturaux (Pereira *et al*., 2006). L'équation d'ET_o donnée par la méthode FAO-PM pour une période de 24 heures est :

$$ET_o = \frac{0,408\, s\left(R_n - G\right) + \gamma\,(900/T_a + 273)\, u_2\, (e_s - e_a)}{s + \gamma\left(1 + 0,34 u_2\right)} \qquad \text{(Éq. 2)}$$

où ET_o est l'évapotranspiration de référence (mm j^{-1}), R_n le rayonnement net à la surface de la culture (MJ m^{-2} j^{-1}), G le flux de chaleur à la surface du sol (MJ m^{-2} j^{-1}), T_a la température moyenne quotidienne de l'air à une hauteur de 2 m (°C), u_2 la vitesse du vent à 2 m (m s^{-1}), e_s et e_a les pressions de vapeur d'eau saturante et réelle de l'air à 2 m (kPa), s la pente (en Pa °C^{-1}) de la relation entre e_s et la température, γ la constante psychrométrique (kPa °C^{-1}), 900 un coefficient pour le gazon (kJ^{-1} kg K ; lié aux unités utilisées et à la substitution de ρ_a, c_h et g_a), 0,34 un coefficient de vent pour le gazon (kJ^{-1} kg K ; provenant de g_a/g_c) et 0,408 l'inverse de λ la chaleur latente de vaporisation de l'eau (2,45 MJ kg^{-1}).

L'évapotranspiration d'une culture (ET_c) peut se calculer directement par l'équation 1 si on dispose de données suffisantes pour le calcul des paramètres de culture (notamment g_a et g_c). Cependant dans la pratique de l'irrigation, on multiplie généralement ET_o par un coefficient cultural, k_c, lequel varie un peu avec le climat, mais essentiellement avec les caractéristiques propres de la culture (Pereira *et al*., 2006). Les coefficients culturaux (fournis par la FAO) sont établis expérimentalement ($k_c = ET_c/ET_o$) à partir de mesures d'ET_c (par exemple, à l'aide des lysimètres pesables) et par estimation d'une valeur d'ET_o à l'aide de l'équation 2. La validité de ces coefficients culturaux a été prouvée par de nombreuses applications rapportées dans la littérature (par exemple, Allen *et al*., 2005) ainsi que par des approches par télédétection (Neale *et al*., 2005). Le coefficient k_c peut varier selon le développement cultural, présentant des valeurs différentes pour la phase initiale (0,3–0,7), la mi-saison (0,9–1,15) et l'arrière-saison (de la maturation à la récolte; 0,25–1,15).

APPROCHES BASÉES SUR LE BILAN HYDRIQUE DU SOL

L'apport nécessaire en eau par irrigation pour répondre aux besoins en évapotranspiration de la culture dépend du type de culture, des caractéristiques du sol et de la météorologie. Différentes cultures ont des caractéristiques de croissance qui se traduisent par différents taux relatifs d'utilisation de l'eau. Les sols varient dans leurs caractéristiques texturales et hydriques, telles que la capacité au champ, le point de flétrissement et le mouvement capillaire. Afin de tenir compte de tous ces éléments, Simonne *et al.* (2011) recommandent, pour la planification de l'irrigation dans les cultures maraîchères, d'utiliser des modèles dynamiques de bilan hydrique du sol, incluant la météorologie et l'évolution du stade phénologique de la culture, et des mesures directes de l'état hydrique du sol au champ.

Le logiciel VSMB (*Versatile Soil Moisture Budget*), développé par des chercheurs d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, est un modèle de bilan hydrique semi-dynamique pouvant s'avérer un compromis intéressant pour les producteurs. Une version nommée IRRIGUE a été proposée au début des années 1990 comme outil de gestion de l'irrigation, initialement mis au point pour la culture de la pomme de terre. Dans cette culture, certains essais ont été effectués et les résultats ont démontré son utilité. Le logiciel VSMB offre les avantages des modèles dynamiques tout en étant simple d'utilisation. Avant de débuter son utilisation, il est nécessaire de caractériser plusieurs éléments du site désiré et de la culture simulée : i) courbe de rétention d'eau et profil hydrique du sol (densité apparente, saturation, capacité au champ, point de flétrissement, etc.) à plusieurs profondeurs, ii) caractérisation de la culture en termes de prédiction de rendement et de l'extraction de l'eau pour chaque stade phénologique et profondeur de sol et iii) initialisation de la quantité d'eau présente dans chaque horizon du sol au début de la simulation. Au cours de la saison de croissance, les données suivantes doivent être recueillies et intégrées dans les fichiers appropriés : i) la quantité d'eau ajoutée à chacune des dates où il y a eu irrigation et ii) les données météorologiques quotidiennes, soit la température maximale, la température minimale et les précipitations. Optionnellement, les prévisions météorologiques pour les prochains jours peuvent aussi être intégrées dans le même format que les données météorologiques. Comme les prévisions météorologiques concernant les précipitations sont habituellement exprimées en probabilité de précipitations, l'utilisateur doit transformer lui-même cette probabilité (%) en quantité de pluie (mm) pour effectuer les simulations désirées.

À partir du moment où tous ces paramètres sont configurés et intégrés dans les différents fichiers, il est possible de simuler la dynamique de l'eau dans les différents horizons de sol qui ont été configurés. Les résultats de simulation peuvent être illustrés de différentes façons, dont les quantités d'eau provenant des précipitations et de l'irrigation et les quantités d'eau simulées dans le sol. L'utilisation d'un logiciel comme VSMB pour prédire la quantité d'eau dans le sol offre un excellent potentiel pour la régie de l'irrigation, pourvu que l'on puisse caractériser adéquatement les coefficients associés à l'extraction de l'eau pour chaque stade phénologique de la culture et pour chaque profondeur de sol, informations qui sont rarement disponibles dans la littérature. De plus, il est important de calibrer régulièrement les prédictions d'humidité du sol avec des observations fiables au champ. Il semble que l'utilisation de tensiomètres serait la méthode la plus simple et efficace pour effectuer ces observations. Toutefois, comme plusieurs équipements de mesure, l'utilisation adéquate et l'entretien minutieux sont deux critères essentiels pour assurer le bon fonctionnement de ceux-ci.

À titre d'information, un nouvel outil de planification de l'irrigation basé sur le bilan hydrique sera offert en mode expérimental à une clientèle cible dès la prochaine saison agricole. Développée en Colombie-Britannique (BC) par l'« *Irrigation Industry Association of BC* », cette interface Web a été traduite et adaptée ces derniers mois afin de pouvoir intégrer des observations et prévisions météorologiques du Québec. En plus de la météorologie (température, évapotranspiration et précipitations), cet outil tient compte également du type de culture, de la nature des sols et du système d'irrigation employé afin de proposer des quantités d'eau d'irrigation à appliquer pour répondre aux besoins des cultures. Au cours des deux prochaines années, il est prévu de tester la performance de ce modèle sous nos conditions et d'évaluer une approche hybride, soit l'outil de la BC couplé à des mesures en temps réel des conditions hydriques du sol.

RÉFÉRENCES

Allen, R.G. *et al*. 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, p. 300.

Allen, R.G. *et al.* 2005. *Prediction accuracy for projectwide ecapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 131 : 24–36.

Bourgeois, G. 2006. *Planification des irrigations à l'aide de modèles bioclimatiques*. Colloque sur l'irrigation, Boucherville, 10 février 2006. CRAAQ.

Campbell, G.S. et J.S. Norman. 1998. *An introduction to environmental biophysics*, Springer-Verlag, New-York, 2e édition, 286 p.

Lascano, R.J., 2007. *The soil-plant-atmosphere system and monitoring technology*. Dans Lascano, R.J. & Sojka R.E. (eds). Irrigation of Agricultural Crops. 2e édition. Agronomy no. 30. pp. 85–115.

Neale C.M.U. *et al.* 2005. *Irrigation water management using high resolution airborne remote sensing*. Irrigation and Drainage Systems. 19: 321–336.

Penman, H.L., 1948. *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proceedings of the Royal Society, London A, 193: 120–145.

Pereira, L.S. *et al*. 2006. *Méthode pratique du calcul des besoins en eau*. Dans Tiercelin, J.-R. & Vidal A. (eds). Traité d'irrigation. Lavoisier, Paris, 2e édition, pp. 227–268.

Simonne, E.H. *et al.* 2011. Chapter 3. *Principles and practices of irrigation management for vegetables*. Université of Florida, IFAS Extension 2011-2012 AE260. pp. 17-27.

Outils agrométéorologiques pour la planification de l'irrigation des cultures

Steeve Pepin, Sols et génie agroalimentaire, Université Laval

Gaétan Bourgeois, AAC, Centre de recherche et développement en horticulture, Saint-Jean-sur-Richelieu

UNIVERSITÉ LAVAL

Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation

Plan de la présentation

- Mise en contexte
- Évapotranspiration : potentielle (ETP), de référence (ET_o) et réelle ($ET_{culture}$)
- Éléments requis pour prédire l'ET
- Avantages et limites de l'approche ET
- Modèles de bilan hydrique du sol
- Modèle « *Versatile Soil Moisture Budget* »

UNIVERSITÉ LAVAL

Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation

Planifier l'irrigation des cultures

Photo : Gayle Clement (2004)

Efficacité de l'utilisation de l'eau (EUE)

EUE d'une culture

Acquisition de C ÷ Volume total d'eau utilisée

Respiration + Photosynthèse

ISF, structure du couvert

Interception de la lumière

x

Assimilation foliaire

x

Transpiration foliaire

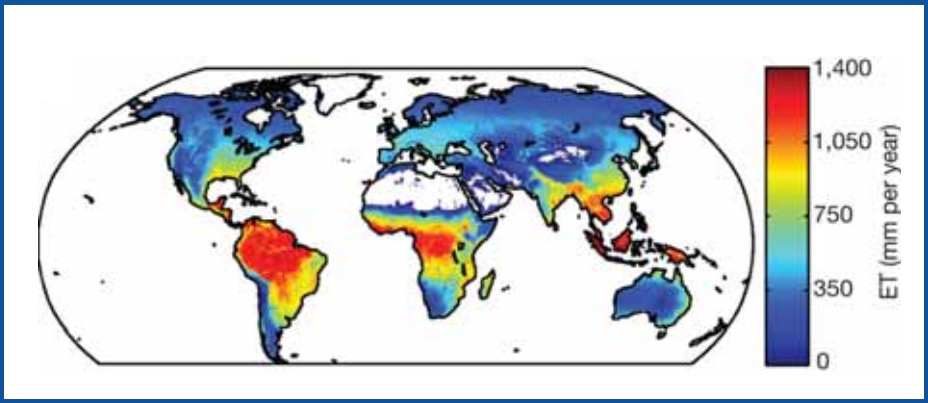
($E = g_s \times DPV$)

Évaporation (sol)
Ruissellement
Drainage

Flexas *et al*. (2010)

Évapotranspiration à l'échelle planétaire

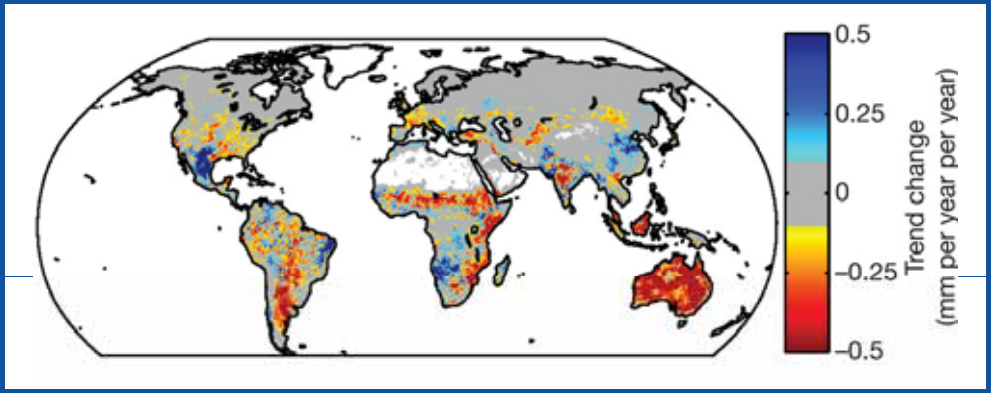
Augmentation de ~ 7 mm /année
(1982–1997)



Jung *et al*. (2010)

Diminution de l'ET à l'échelle planétaire

Tendance à la baisse
(1998–2008)

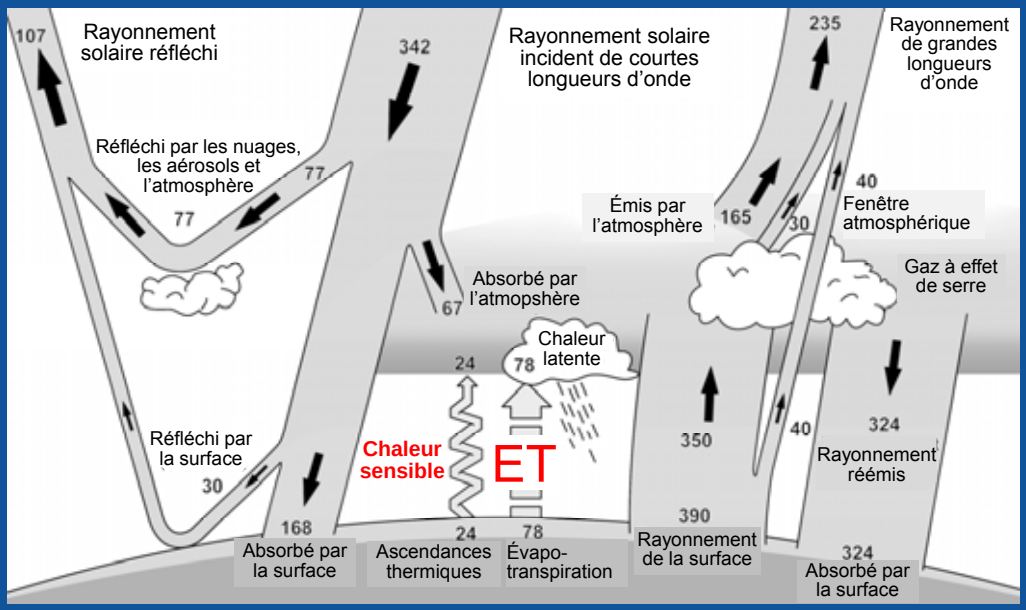


Jung *et al*. (2010)

Évapotranspiration

- **Évapotranspiration** (ET) : quantité de vapeur d'eau transférée dans l'atmosphère par transpiration (plantes) et par évaporation au niveau du sol
- **Évapotranspiration potentielle** (ETP) : valeur maximale d'ET en fonction des caractéristiques énergétiques et dynamiques de l'atmosphère (suffisamment d'eau pour satisfaire la demande évaporative)
- **Évapotranspiration réelle** ($ET_{culture}$) : perte de vapeur d'eau effective subie par un couvert végétal. Moindre que l'ETP à cause des résistances à la circulation de l'eau (sol–plantes) et à la diffusion de la vapeur d'eau (feuilles–atmosphère)
- **ET d'une culture bien irriguée** : 2 à 5 mm par jour

Bilan énergétique et vapeur d'eau

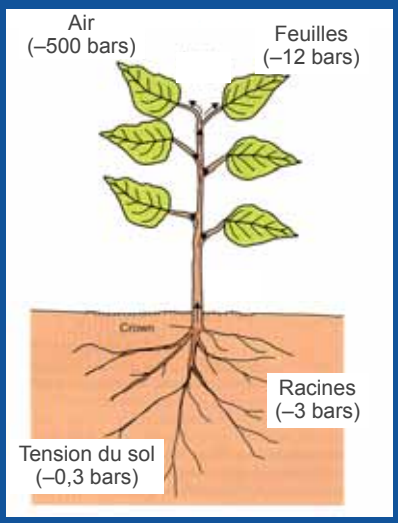


Bilan énergétique de la Terre en W m^{-2} (Tiré de Onil Bergeron, 2007)

Conductance stomatique et DPV

Déficit de pression de vapeur :

→ $(e_{s\ (T°culture)} - e_{air})$



L'ouverture des stomates contrôle :

- les flux de vapeur d'eau
- la quantité d'énergie dissipée par ET *vs* chaleur sensible

Équation de Penman pour estimer ET

– Température de la surface évaporante (couvert végétal) est nécessaire pour estimer le flux de vapeur d'eau

– Penman (1948) suggère d'utiliser le bilan énergétique pour remplacer « $T_{surface} - T_{air}$ »

$$E_{surface} = \frac{s(R_n - G) + \rho_a c_h g_H DPV}{\lambda(s+\gamma)}$$

Énergie Déficit de saturation

g_H = transport par convection de la chaleur et de la vapeur d'eau

Équation de Penman-Monteith

– Facteur de correction remplacé par une conductance du couvert (g_c) au transfert de la vapeur d'eau = contrôle physiologique de l'ET par les plantes

ET de référence (ET_o) selon la FAO

$$ET_o = \frac{0{,}408\, s(R_n - G) + \gamma(900/(T_a + 273))\, u_2 (e_s - e_a)}{s + \gamma(1 + 0{,}34\, u_2)}$$

– L'équation P-M permet d'estimer ET_o et les coefficients culturaux

– Pas de temps = 24 heures

ET de référence et coefficients culturaux

- **Référence** = gazon d'une hauteur ~8 à 15 cm, albédo ~0,23 et g_v ~0,014 m s^{-1}; (luzerne pour les cultures de grande taille)
- ET_o élimine le calage local pour chaque culture
- On multiplie ET_o par un coefficient cultural (k_c) pour obtenir $ET_{maximale}$
- $k_c = ET_{culture} / ET_o$
- k_c peut varier selon le stade phénologique

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation

Avantages et limites de Penman-Monteith

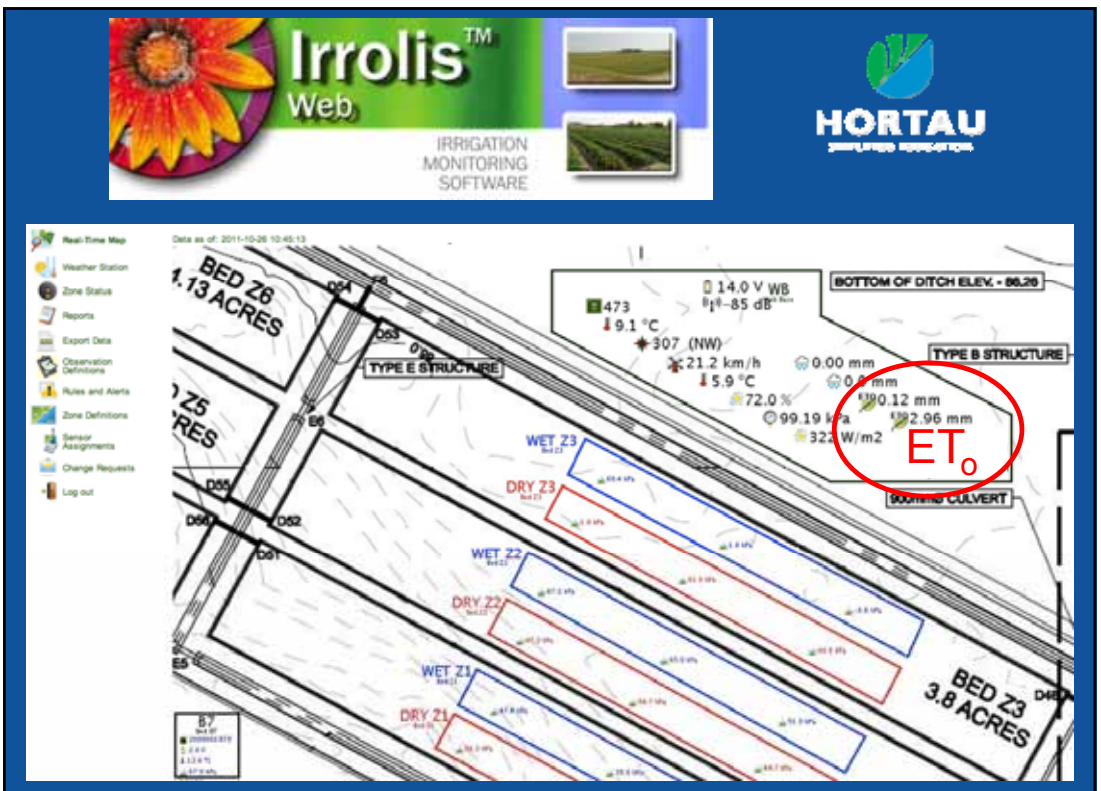
Avantages

- $ET_{maximale}$ pour guider les apports par irrigation (ajustés en fonction des relevés tensiométriques)
- Pratique pour démarrer les irrigations (Δ réserve utile)
- Estimé fiable d'ETP; aucun calage local

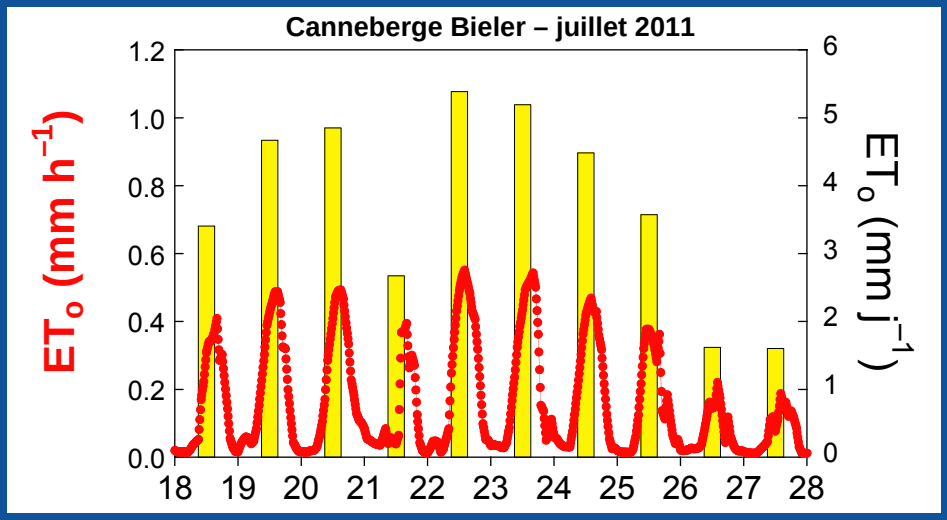
Limites

- k_c varie durant la saison, espacement des rangs
- Aucune culture de référence pour couvert de maïs
- Conductance g_c varie avec le climat, pratiques culturales
- Estimation indirecte d'$ET_{culture}$; résolution spatiale

UNIVERSITÉ LAVAL
Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation



Estimation de l'ET_o (équation P-M FAO)

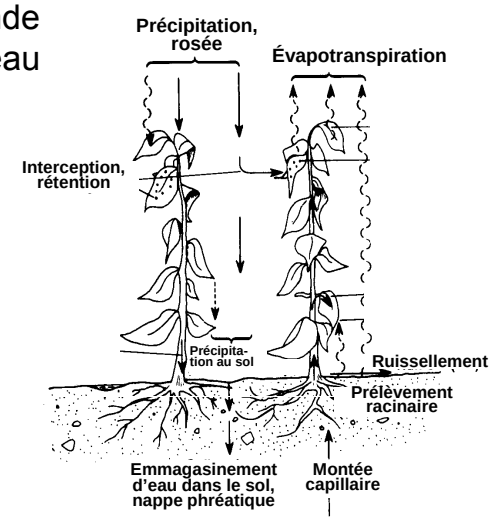


Approche agrométéorologique

Requiert une estimation de la demande en eau (ETP) et des ressources en eau (réserve en eau du sol, pluie, doses d'irrigation apportées)

1) Modéliser le bilan hydrique du sol (par ex., deux réservoirs :
   - superficiel : ~40% de RU
   - profond : ~60% de RU

2) Utiliser "Pluie – ETP" sans bilan hydrique du sol



Sommaire

- Données météo disponibles en temps réel pour évaluer les besoins en eau des cultures via des mesures de précipitations et l'estimation de l'ETP
- Bilan hydrique du sol permet de calculer ETR et puis la dose d'irrigation est estimée par ETM – ETR
- Dépend de la précision des paramètres culturaux (variation de k_c; double coefficients)
- Utilisation judicieuse de l'eau

UNIVERSITÉ LAVAL

Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation

Agriculture et Agroalimentaire Canada | Agriculture and Agri-Food Canada

Outils agrométéorologiques pour la planification de l'irrigation des cultures

Gaétan Bourgeois[1] et Steeve Pépin[2]

[1] AAC, Centre de recherche et développement en horticulture, Saint-Jean-sur-Richelieu

[2] Université Laval, Québec

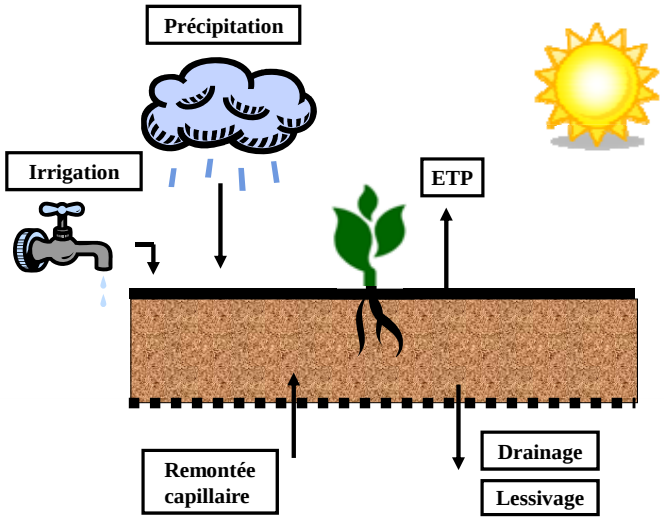
Canada

Planification de l'irrigation des cultures

i. Déterminer la quantité d'eau requise par la culture
ii. Déterminer le temps le plus approprié pour effectuer l'opération

- Outil d'aide à la décision : bilan hydrique du sol
- Recommandation de Simonne *et al.* (2011) pour les cultures maraîchères :
  - Utiliser des modèles dynamiques de bilan hydrique du sol, incluant la météorologie et l'évolution du stade phénologique de la culture
  - Utiliser des mesures directes de l'état hydrique du sol au champ

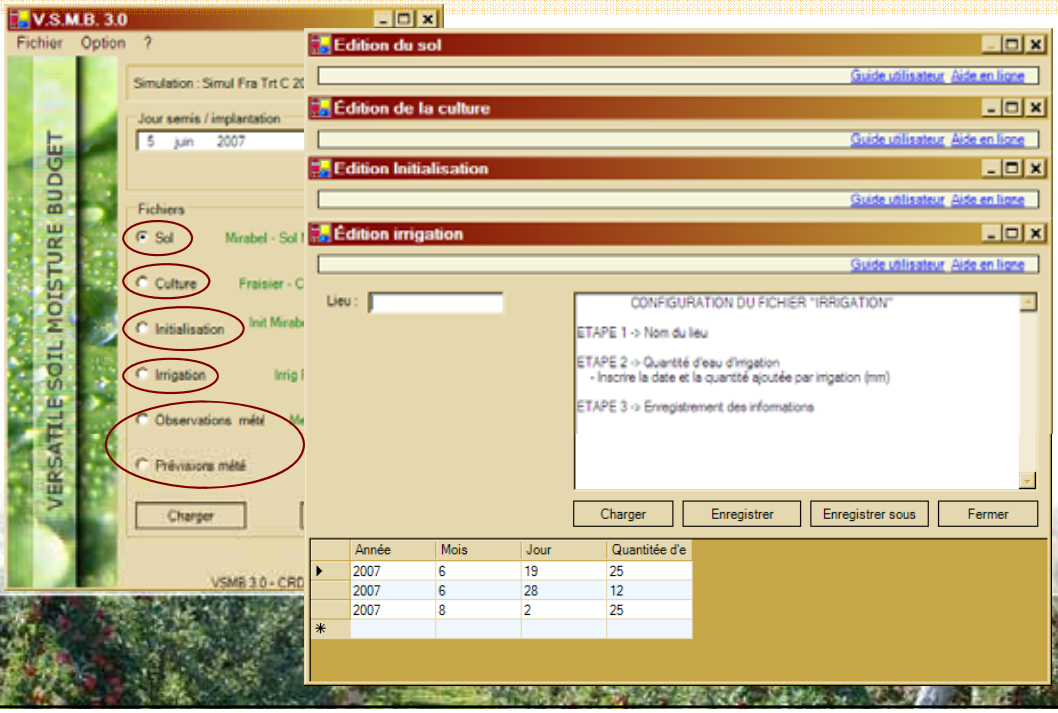
Représentation du principe de bilan hydrique



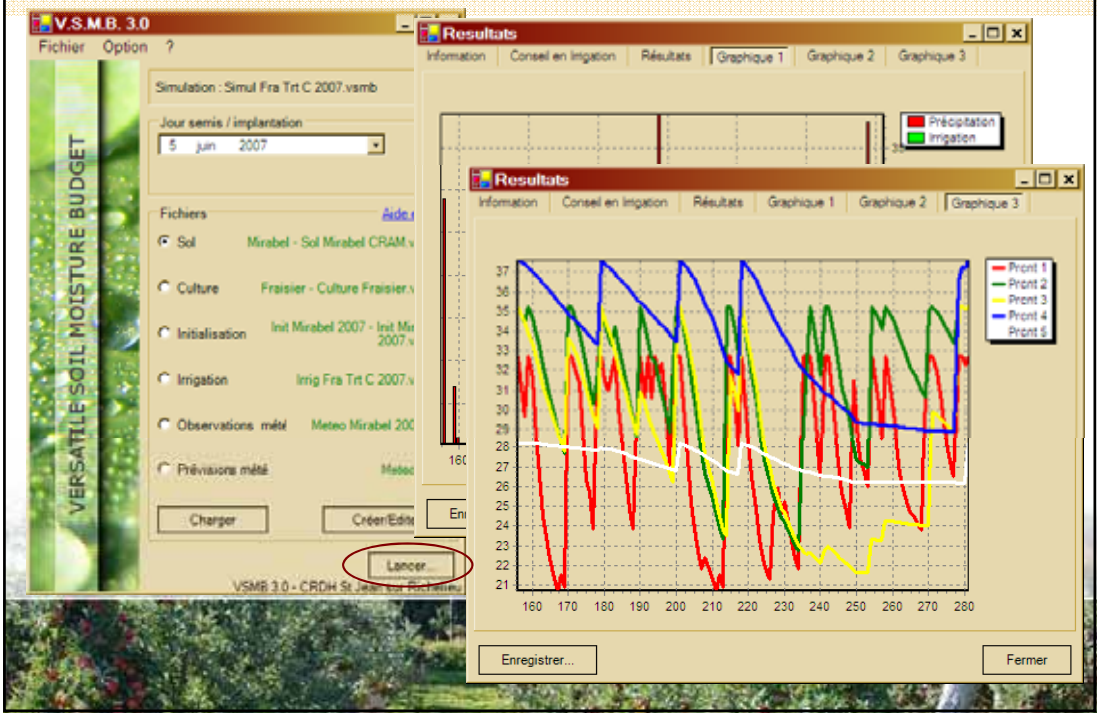
VSMB (*Versatile Soil Moisture Budget*)

- Résultat de recherches sur la modélisation de l'humidité des sols
- Initialement proposé par Baier et Robertson (1966)
- Version 1 : Baier et coll. (1972)
- Version 2 : Baier et coll. (1979)
- Version 3 : Dyer et Mack (1984), évaluation au champ
- Versoin 4 : Boisvert *et al.* (1992), manuel de référence
- IRRIGUE (Boisvert *et al*. (1990), testé de façon limitée pour certaines cultures au Québec
- Traduction de VSMB du langage Fortran à Visual Basic (Bourgeois *et al*., 2005), évaluation dans le cadre d'un projet sur l'irrigation du chou-fleur et du fraisier

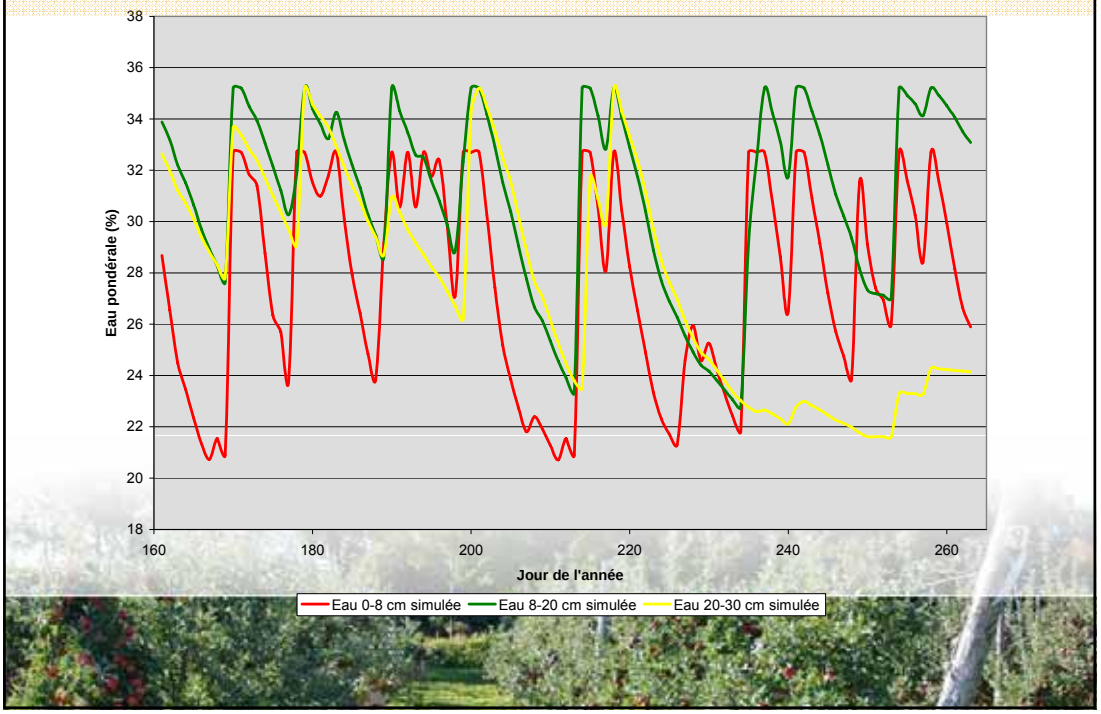
Prédictions de l'humidité du sol (VSMB)



Prédictions de l'humidité du sol (VSMB)



Prédictions de l'humidité du sol (VSMB)



Conclusions

- VSMB : excellent potentiel pour planifier les irrigations
- Limite principale : capacité à caractériser adéquatement les coefficients associés à l'extraction de l'eau
  - pour chaque stade phénologique de la culture
  - pour chaque profondeur de sol
- Calibration régulière des prédictions d'humidité du sol avec des mesures fiables au champ
  - Exemple : tensiomètres
  - Critères : utilisation adéquate, entretien minutieux

Planification de l'irrigation (BC)
→ Projet pilote pour une implantation au Québec