Université de Mila
Faculté des Sciences de la Vie et de la Nature
Département des Sciences Biologiques et Agricoles
Master Académique : Production Végétale (S1)

Chapitre III : Modélisation et Bilans Hydriques

MODULE : GESTION ET PILOTAGE DE L'IRRIGATION

Introduction

La gestion rationnelle de l'irrigation repose fondamentalement sur la modélisation mathématique du continuum Sol-Plante-Atmosphère et la quantification rigoureuse des flux d'eau. Ce troisième chapitre aborde la dimension dynamique de l'irrigation avec une profondeur analytique poussée. Il s'agit de comprendre les mécanismes intimes qui lient l'eau au rendement final à travers les modèles mathématiques (CROPWAT et AquaCrop), puis de maîtriser les équations du bilan hydrique du sol pour assurer un pilotage de précision in situ.

1. Modélisation de la relation Eau-Rendement : Les deux grandes écoles

En agronomie, il existe deux générations de logiciels avec deux philosophies différentes pour modéliser l'impact de l'eau sur les cultures : l'approche empirique (type CROPWAT) et l'approche mécaniste (type AquaCrop).

1.1. Modélisation macroscopique avec CROPWAT (L'approche du "Comptable")

Le logiciel CROPWAT utilise une fonction de production empirique (FAO-33, Doorenbos et Kassam, 1979). Ce modèle regarde l'irrigation comme un "compte en banque" : il établit une relation de proportionnalité directe entre le déficit en eau et la perte de rendement. L'équation de base est :

$$(1 - Ya / Ym) = Ky \times (1 - ETa / ETc)$$

Cette équation est la célèbre fonction de production de l'eau issue du Bulletin FAO-33 (Doorenbos et Kassam, 1979). C'est le moteur mathématique du logiciel CROPWAT qui permet de calculer les pertes de récolte lorsqu'une culture subit un stress hydrique.

Avec :

Les paramètres de rendement (La récolte)

- **Ya (Rendement réel / Actual Yield) :** C'est la récolte finale que l'agriculteur va réellement obtenir après que la plante ait souffert d'un manque d'eau. Unité : kg/ha ou tonnes/ha (t/ha).

- **Ym (Rendement maximal potentiel / Maximum Yield) :** C'est la récolte théorique parfaite. C'est ce que la variété aurait produit dans cette région si elle n'avait jamais manqué d'une seule goutte d'eau sur tout son cycle. Unité : kg/ha ou tonnes/ha (t/ha).

Les paramètres hydriques (La consommation d'eau)

- **ETa (Évapotranspiration réelle / Actual Evapotranspiration) :** C'est le volume d'eau que la culture a effectivement réussi à extraire du sol et à transpirer, compte tenu de la sécheresse ou du manque d'irrigation. Unité : mm.
- **ETc (Évapotranspiration de la culture / Crop Evapotranspiration) :** C'est le besoin en eau optimal de la plante (calculé avec ETc = ETo × Kc). C'est l'eau qu'elle aurait voulu consommer pour tourner à plein régime. Unité : mm.

Le paramètre biologique (La sensibilité de la plante)

- **Ky (Coefficient de réponse au stress hydrique) :** C'est un indicateur propre à l'espèce végétale (et à son stade de développement) qui mesure sa vulnérabilité face à la soif. (Sans dimension).

Pour rendre cette formule très visuelle, nous pouvons la découper en trois blocs logiques :

- Le bloc (1 - ETa / ETc) représente le pourcentage de déficit en eau (la proportion d'eau qui a manqué à l'appel).
- Le bloc (1 - Ya / Ym) représente le pourcentage de chute de la production (la proportion de récolte perdue).
- Le coefficient Ky est le multiplicateur qui relie la soif à la perte financière. Si le Ky est supérieur à 1 (comme pour le maïs ou la tomate en floraison), la chute de rendement sera proportionnellement plus grave que le manque d'eau initial.

Comprendre le paramètre Ky (Coefficient de réponse du rendement) :

Le Ky traduit le "caractère" de la plante face à la soif :

- Si Ky = 1 : La relation est strictement proportionnelle. 10% d'eau en moins entraînent 10% de rendement en moins.
- Si Ky > 1 (La plante sensible) : La plante panique vite. Si vous réduisez l'eau de 10%, son rendement chute de 15% ou 20%. C'est typiquement le cas du maïs au moment critique de la floraison.
- Si Ky < 1 (La plante rustique) : La plante est résistante. Si vous réduisez l'eau de 10%, son rendement ne baisse que de 5%. C'est le cas du blé en fin de cycle (maturation).

Application au pilotage (L'irrigation déficitaire) :

Sur le terrain, lorsque les ressources en eau sont limitées (ex: barrages à bas niveau), l'agronome utilise le Ky pour pratiquer l'"irrigation déficitaire régulée". La stratégie consiste à couper sciemment l'eau durant les phases où le Ky est inférieur à 1 (la plante souffre mais le rendement final est peu impacté), et à concentrer les apports d'eau massifs durant les phases où le Ky est supérieur à 1 (pour sauver le rendement).

1.2. Modélisation mécaniste avec AquaCrop (L'approche du "Biologiste")

Pour dépasser les limites de CROPWAT, la FAO a développé AquaCrop (FAO-66). Ce modèle construit virtuellement la plante jour par jour. Il sépare l'eau qui s'évapore bêtement du sol nu (Évaporation - E) de l'eau qui traverse réellement la plante (Transpiration - Tr). AquaCrop part du principe que chaque goutte d'eau qui transpire sert à fabriquer de la matière sèche (Biomasse).

A. L'équation centrale de la Biomasse :

$$\mathbf{B = WP^* \times \Sigma\ (Tr / ETo)}$$

Où WP* est la Productivité de l'Eau normalisée (g/m²). C'est un paramètre très stable : pour les plantes (blé, tomate), WP* est d'environ 15 à 20 g/m² ; pour les plantes (maïs), il est de 30 à 35 g/m² (plus efficientes).

B. La chronologie du stress (Les 4 freins "Ks") :

Quand le sol s'assèche, la plante déclenche des mécanismes de survie dans un ordre très précis. AquaCrop modélise ces réactions via 4 coefficients de stress (Ks), allant de 1 (pas de stress) à 0 (stress total) :

1. **1er frein : L'arrêt de la croissance (Ks_exp).** C'est le processus le plus sensible. Dès que le sol sèche légèrement, la plante n'a plus assez de pression interne (turgescence) pour gonfler ses cellules. Elle arrête de fabriquer de nouvelles feuilles. Le développement du couvert végétal (Canopy Cover) stagne.
2. **2ème frein : La fermeture des stomates (Ks_sto).** Le sol devient vraiment sec. Pour ne pas mourir déshydratée, la plante ferme ses pores (stomates). En fermant ses pores, elle ne respire plus de CO2. La photosynthèse s'arrête, et la production de biomasse tombe à zéro.
3. **3ème frein : La sénescence (Ks_sen).** C'est la survie extrême. La plante sacrifie et tue ses vieilles feuilles pour réduire au maximum sa surface d'évaporation.
4. **4ème frein : L'avortement (Ks_HI).** Si le stress survient au moment de la floraison, la plante sacrifie sa reproduction. Les fleurs tombent, et l'Indice de Récolte (Harvest Index - HI) s'effondre.

Le rendement final (Y) s'obtient enfin par l'équation : $Y = B \times HI$.

2. Bilan Hydrique et Pilotage de Précision

2.1. Paramétrage physique du réservoir "Sol" (L'analogie de l'éponge)

Avant de calculer un bilan, l'agronome doit définir les bornes physiques du sol, que l'on peut comparer à une éponge :

- **Capacité au Champ (Hcc) :** Vous sortez l'éponge de l'eau, elle ne goutte plus, mais elle est totalement gorgée d'eau. C'est la quantité maximale utile qu'un sol peut retenir contre la gravité après ressuyage.
- **Point de Flétrissement Permanent (Hpf) :** L'éponge est tellement essorée qu'une plante n'a plus la force d'y aspirer la moindre goutte. La force de rétention du sol dépasse la force de succion des racines (environ 15 bars). La plante meurt.

La Réserve Utile (RU) est le volume d'eau contenu entre l'éponge gorgée (Hcc) et l'éponge sèche (Hpf), ramené à la profondeur des racines (Z) :

$$\mathbf{RU\ (mm) = (Hcc - Hpf) \times Densité\ apparente \times Z\ (dm)}$$

Cependant, la plante ne peut pas épuiser toute la RU sans souffrir. On définit alors la Réserve Facilement Utilisable (RFU). C'est la fraction de cette eau que la plante peut boire "sans faire d'effort". Dès qu'on dépasse cette RFU (définie par le coefficient p), la plante force pour boire, et le premier frein de croissance (Ks_exp) s'enclenche.

$$\mathbf{RFU = RU \times p}$$

2.2. L'Équation journalière du Bilan Hydrique

Le stock d'eau du sol au jour i (Si) s'obtient en ajoutant les entrées et en soustrayant les sorties par rapport au jour précédent (Si-1) :

$$\mathbf{Si = Si\text{-}1 + (Peff + I + CR) - (ETc + DP + RO)}$$

Détails agronomiques :

- **Peff (Pluie efficace) :** Ne correspond pas à la pluie totale tombée. Une grosse averse orageuse sur un sol lourd sera en grande partie perdue par ruissellement de surface (RO).
- **DP (Percolation Profonde) :** L'eau qui descend sous la zone racinaire. Bien que ce soit une "perte" d'eau pour la plante, c'est un outil indispensable pour le lessivage des sels (LR) vu au Chapitre II.

2.3. Ajustement en temps réel (Capteurs in situ)

Le bilan théorique informatisé est sujet à des erreurs cumulatives. Le pilotage de précision exige un recalage par l'instrumentation sur le terrain. Il faut bien distinguer deux logiques de capteurs :

A. La sonde capacitive ou FDR/TDR (La mesure d'un VOLUME) :

Ces capteurs électromagnétiques vous disent concrètement : "Il reste X litres d'eau dans ce mètre cube de terre". Placés à plusieurs profondeurs, ils permettent de visualiser l'infiltration de l'eau et la zone exacte d'absorption des racines.

B. La Tensiométrie (La mesure d'une FORCE / L'effort des racines) :

Le tensiomètre ne mesure pas un volume d'eau, il mesure l'effort de succion (en centibars ou kPa). L'analogie parfaite est celle de boire un milkshake épais avec une paille : plus le sol est sec, plus la racine doit aspirer fort. Le déclenchement de l'irrigation se fait sur la base de seuils de fatigue :

- **Pour les cultures maraîchères (ex : tomate) :** On irrigue dès que l'effort atteint 30 à 50 centibars.
- **Pour l'arboriculture (ex : olivier) :** L'arbre est plus fort, on attend un effort de 50 à 80 centibars avant d'irriguer.

Références Bibliographiques

- [1] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italie.
- [2] Doorenbos, J., Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and drainage paper 33. Rome, Italie.
- [3] Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E. (2012). Crop yield response to water. FAO Irrigation and drainage paper 66. Rome, Italie.

Tableau récapitulatif du coefficient de réponse au rendement (Ky) pour les principales cultures à leurs différents stades de développement, tiré de la référence mondiale officielle : **Bulletin FAO n°33** (*Yield response to water* - Doorenbos et Kassam, 1979).

Culture	Phase Végétative	Floraison (Reproduction)	Formation du rendement	Maturation (Arrière-saison)	Cycle Complet (Total)
Maïs	0.40	**1.50** (très sensible)	0.50	0.20	**1.25**
Tomate	0.40	**1.10**	0.80	0.40	**1.05**
Blé d'hiver	0.20	0.60	0.50	0.10	**1.00**
Pomme de terre	0.45	-	**0.80** (tuberisation)	0.20	**1.10**
Haricot / Fève	0.20	**1.10**	0.75	0.20	**1.15**
Oignon	0.45	-	**1.00** (grossissement)	0.25	**1.10**
Tournesol	0.40	**1.00**	0.80	0.20	**0.95**
Sorgho	0.20	0.55	0.45	0.20	**0.90**
Coton	0.20	0.50	0.40	0.25	**0.85**

Interprétation agronomique :

- **Ky < 1 (Tolérance) :** Les stades comme la phase végétative ou la maturation ont un Ky faible. Une restriction hydrique à ce moment précis fera souffrir la plante, mais l'impact sur le poids final de la récolte sera négligeable. C'est ici qu'on pratique l'irrigation déficitaire.

- **Ky > 1 (Sensibilité critique) :** La phase de floraison (pour le maïs, la tomate, le haricot) ou de formation du tubercule/bulbe (pomme de terre, oignon) est extrêmement vulnérable. Un manque d'eau à ce stade entraîne un effondrement irréversible de la récolte finale.