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 II : Détermination des besoins en eau des cultures

MATIÈRE : GESTION ET PILOTAGE DE L'IRRIGATION

Introduction :

L'eau est une ressource vitale et de plus en plus limitée, particulièrement dans les régions arides et semi-arides comme l'Algérie, où l'agriculture est le secteur le plus consommateur d'eau (près de 70% des prélèvements). Dans ce contexte de changement climatique et de raréfaction de la ressource, une gestion rigoureuse et scientifique de l'irrigation est primordiale.

Le pilotage de l'irrigation ne consiste plus seulement à apporter de l'eau, mais à l'apporter au bon moment et dans les quantités exactes nécessaires pour optimiser le rendement tout en préservant la ressource et le sol (éviter le lessivage des nutriments ou la salinisation). Cela nécessite d'évaluer avec précision les quantités d'eau réellement perdues et consommées par le système "sol-plante". C'est l'objectif fondamental du calcul des besoins en eau des cultures, qui repose sur la quantification de l'évapotranspiration.

1. L'Approche FAO-56 : Calcul de l'Évapotranspiration

La méthode standard internationalement reconnue pour estimer ces besoins est l'approche définie dans le Bulletin FAO-56 (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Cette méthode sépare l'influence du climat de l'influence spécifique de la culture.

Le Bulletin FAO-56 (publié en 1998) est le document de référence mondial qui a standardisé une équation simple et universelle :

$$\boldsymbol{ETc = ETo \times Kc}$$

L'aspect majeur de cette approche est d'avoir modélisé le besoin en eau (ETc) en scindant le calcul en deux variables totalement indépendantes :

- **L'influence exclusive du climat (L'Évapotranspiration de référence - ETo) :** Cette variable représente la "soif" ou le pouvoir évaporant de l'atmosphère. Elle ne dépend strictement que de la météorologie (température, rayonnement solaire, vent et humidité).

Elle est mesurée sur une surface virtuelle standard (un gazon de 12 cm toujours bien arrosé). Ainsi, que l'on cultive des tomates, des dattes ou du blé dans une région donnée (comme Mila ou Constantine), l'ETo restera exactement la même pour tout le monde.

- **L'influence exclusive de la culture (Le coefficient cultural - Kc) :** Cette variable est purement biologique. Elle traduit les caractéristiques propres à la plante (espèce, hauteur, couverture foliaire, résistance aérodynamique) et évolue selon son stade de croissance (germination, floraison, maturité).

2. L'Évapotranspiration de Référence (ETo)

L'ETo représente le pouvoir évaporant de l'atmosphère indépendamment du type de culture, du stade de développement ou des pratiques culturales. Elle est définie comme l'évapotranspiration d'une surface hypothétique de gazon bien arrosé, d'une hauteur uniforme de 0,12 m, avec une résistance de surface fixe de 70 s/m et un albedo de 0,23.

2.1. La méthode Penman-Monteith (FAO)

Le calcul de l'ETo (exprimée en mm/jour) repose sur la méthode combinée de Penman-Monteith, qui intègre les données météorologiques locales. Les quatre paramètres climatiques strictement nécessaires au calcul sont :

- Le rayonnement solaire (ou durée d'insolation)
- La température de l'air (maximale et minimale)
- L'humidité relative de l'air
- La vitesse du vent (mesurée à 2 mètres du sol)

Ces paramètres permettent de quantifier l'énergie disponible pour vaporiser l'eau et la capacité du vent à évacuer la vapeur formée. En Algérie, l'ETo est particulièrement élevée en été dans les zones sahariennes et les hauts plateaux, atteignant souvent 8 à 10 mm/jour.

3. Les Coefficients Culturaux (Kc)

L'Évapotranspiration sous conditions standards de la culture (ETc) est calculée en multipliant l'ETo par un coefficient cultural (Kc). Ce coefficient intègre les caractéristiques physiques de la plante, notamment le développement de son couvert végétal, sa hauteur et son contrôle de la transpiration.

Le passage du climat à la culture se fait par l'équation fondamentale :

$$\boldsymbol{ETc = ETo \times Kc}$$

Le cycle de vie de la culture est divisé en quatre phases de développement, auxquelles correspondent des valeurs spécifiques de Kc, formant la "courbe du coefficient cultural" :

La valeur du Kc dépend fortement du taux de couverture du sol par les feuilles. En phase initiale, le Kc est faible (l'évaporation directe du sol domine). À mi-saison, lorsque la plante atteint son développement maximal, le Kc est à son apogée.

Type de Culture	Kc Initial (Kc ini)	Kc Mi-saison (Kc mid)	Kc Fin de cycle (Kc end)
Blé d'hiver	0.30	1.15	0.25
Tomate	0.60	1.15	0.70
Palmier dattier (Sahara)	0.90	0.95	0.95
Arbres fruitiers (sans enherbement)	0.50	0.90	0.65

4. Calcul et calage dynamique du Coefficient Cultural (Kc)

La modélisation rigoureuse des besoins en eau nécessite de calculer le Kc de manière dynamique, au jour le jour, en tenant compte de la date de plantation et de la durée spécifique des phases phénologiques de la culture.

4.1. Méthodologie et formules de calcul

- **Phase initiale :** Le coefficient est constant (Kc = Kc_ini).
- **Phase de développement (Croissance) :** Le Kc augmente linéairement. On utilise la formule d'interpolation suivante pour trouver la valeur exacte au jour "i" :

$$Kci = Kc_précédent + [\ (i - \Sigma(L_précédents)) / L_stade\ ] \times (Kc_suivant - Kc_précédent)$$

- **Phase de mi-saison :** Le coefficient est à son maximum et reste constant (Kc = Kc_mid).
- **Phase d'arrière-saison (Fin) :** Le Kc diminue linéairement. On réutilise la même formule d'interpolation pour modéliser cette chute jusqu'à la récolte (Kc_end).

5. Besoins de Lessivage en Conditions de Salinité (Zones Arides)

Dans les régions arides et semi-arides, comme le Sud de l'Algérie (Biskra, El Oued), le calcul des besoins en eau ne s'arrête pas à la simple compensation de l'évapotranspiration. La forte évaporation tend à concentrer les sels dissous dans la zone racinaire, phénomène aggravé lorsque l'eau d'irrigation est elle-même chargée en sels (eaux saumâtres souterraines ou eaux usées épurées).

Pour éviter la stérilisation des sols par salinisation, il est impératif d'apporter une quantité d'eau supplémentaire afin d'entraîner les sels au-delà de la profondeur des racines. C'est ce qu'on appelle le Besoin de Lessivage (Leaching Requirement - LR), formalisé par la FAO dans le Bulletin 29.

5.1. Tolérance des cultures à la salinité

Le besoin de lessivage dépend de deux facteurs clés :

- La Conductivité Électrique de l'eau d'irrigation (CEw), qui mesure son niveau de salinité.
- La tolérance de la plante, exprimée par la Conductivité Électrique de l'extrait de pâte saturée du sol (CEe) au-delà de laquelle le rendement de la culture commence à chuter de manière inacceptable (généralement on vise une perte maximale tolérée de 10% à 25%).

La formule simplifiée classique (modèle de Rhoades) recommandée par la FAO pour calculer la fraction de lessivage en irrigation de surface ou par aspersion est la suivante :

$$LR = CEw / (5 \times CEe - CEw)$$

Où :

- **LR :** Fraction de lessivage (sans dimension, souvent exprimée en %).
- **CEw :** Salinité de l'eau d'irrigation (dS/m).
- **CEe :** Tolérance de la culture (dS/m) pour un niveau de baisse de rendement fixé (ex: 10%).

Une fois la fraction de lessivage calculée, le Besoin Brut en Eau d'Irrigation s'obtient en divisant les besoins nets (ETc) par le rendement du système d'irrigation, et en majorant le tout par ce facteur (1 - LR). Si le besoin de lessivage (LR) n'est pas respecté, le sel s'accumule irrémédiablement, réduisant à néant la productivité agricole.

Références Bibliographiques

- [Allen et al., 1998] 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.
- [Ayers et Westcot, 1985] Ayers, R.S., Westcot, D.W. (1985). Water quality for agriculture. FAO Irrigation and drainage paper 29 Rev.1. Rome, Italie.

Annexe : Tableau des Coefficients Culturaux (Kc) selon la méthode FAO-56

Source : Allen et al., 1998 (FAO Irrigation and Drainage Paper 56).

Ce tableau synthétise les valeurs standards recommandées par la FAO pour les trois principales phases de développement : Stade initial (Kc ini), Mi-saison (Kc mid) et Fin de cycle/Récolte (Kc end). Ces valeurs doivent être calibrées en fonction des conditions climatiques et des pratiques culturales locales (notamment pour l'Algérie).

Catégorie / Culture	Kc Initial (Kc ini)	Kc Mi-saison (Kc mid)	Kc Fin (Kc end)
Céréales			
Blé d'hiver	0.30	1.15	0.25 - 0.40
Blé de printemps	0.30	1.15	0.25 - 0.40
Orge	0.30	1.15	0.25
Avoine	0.30	1.15	0.25
Maïs (grain)	0.30	1.20	0.35 - 0.60
Maïs doux	0.30	1.15	1.05
Sorgho	0.30	1.00 - 1.10	0.55
Cultures Industrielles			
Tournesol	0.35	1.00 - 1.15	0.35
Colza	0.35	1.00 - 1.15	0.35
Betterave sucrière	0.35	1.20	0.70
Coton	0.35	1.15 - 1.20	0.50 - 0.70
Soja	0.40	1.15	0.50
Cultures Maraîchères (Légumes)			
Tomate	0.60	1.15	0.70 - 0.90
Pomme de terre	0.50	1.15	0.75
Oignon (sec)	0.70	1.05	0.75
Oignon (vert)	0.70	1.00	1.00
Ail	0.70	1.00	0.70
Carotte	0.70	1.05	0.95
Chou	0.70	1.05	0.95
Chou-fleur	0.70	1.05	0.95
Brocoli	0.70	1.05	0.95
Concombre	0.60	1.00	0.75 - 0.90
Courgette / Courge	0.50	0.95	0.75

Melon	0.50	1.05	0.75
Pastèque	0.40	1.00	0.75
Poivron / Piment	0.60	1.05	0.90
Aubergine	0.60	1.05	0.90
Haricot vert	0.50	1.05	0.90
Haricot sec	0.40	1.15	0.35
Pois (frais)	0.40	1.15	1.05
Laitue	0.70	1.00	0.95
Épinard	0.70	1.00	0.95
Racines et Tubercules			
Patate douce	0.50	1.15	0.65
Radis	0.70	0.90	0.90
Fourrages et Pâturages			
Luzerne (pour foin)	0.40	1.20	1.15
Trèfle (pour foin)	0.40	1.15	1.10
Ray-grass (pâturage)	0.90 - 1.00	0.90 - 1.00	0.90 - 1.00
Gazon (climat tempéré)	0.90	0.90	0.90
Arboriculture (Arbres Fruitiers)			
Palmier Dattier	0.90	0.95	0.95
Olivier (40 à 60% couverture)	0.65	0.70	0.70
Agrumes (sans couvert végétal)	0.70	0.65	0.70
Agrumes (avec couvert végétal)	0.75	0.70	0.75
Pommier, Poirier (sans couvert)	0.50	0.95	0.75
Pommier, Poirier (avec couvert)	0.80	1.20	0.85
Pêcher, Abricotier, Prunier (sans couvert)	0.50	0.90	0.65
Pêcher, Abricotier (avec couvert)	0.80	1.15	0.85
Amandier (sans couvert)	0.40	0.90	0.65
Noyer (sans couvert)	0.50	1.10	0.65
Vigne (raisin de table)	0.30	0.85	0.45
Vigne (raisin de cuve)	0.30	0.70	0.45
Bananier	0.50	1.10	1.00

Note importante:

- Les valeurs de Kc_ini dépendent fortement de la fréquence des irrigations ou des précipitations (évaporation du sol nu).

- Pour les arbres fruitiers et la vigne, la présence ou l'absence d'un couvert végétal (enherbement) entre les rangées modifie drastiquement le Kc, d'où la séparation dans le tableau.
- Les valeurs de Kc_end pour les cultures destinées à être séchées sur pied (blé, haricot sec) sont beaucoup plus basses que celles récoltées fraîches (tomate, laitue).