

Arroser exactement où et quand il faut : l'irrigation intelligente

Modélisation hydrologique, capteurs IoT et algorithmes d'optimisation pour l'irrigation de précision

Pinel Baudelaire T. DAHOUI

Data Scientist & IA | Ingénieur en Travaux Statistiques
tpineldahoui@gmail.com | github.com/Baudelaire12

21 Avril 2026

Série LinkedIn STEM au Quotidien — Jour 25/40

Plan de la présentation

- 1 Mise en contexte
- 2 Concepts clés
- 3 Développement mathématique
- 4 Cas pratique
- 5 Conclusion
- 6 Références

L'eau agricole : une ressource sous pression

Chiffre clé

L'agriculture consomme **70%** de l'eau douce mondiale (FAO, 2020). Pourtant, les systèmes d'irrigation traditionnels perdent **40 à 60%** de l'eau par évaporation, ruissellement et sur-irrigation. D'ici 2050, la demande en eau agricole pourrait augmenter de **50%** sous l'effet du changement climatique et de la croissance démographique.

- L'irrigation intelligente peut réduire la consommation d'eau de **30 à 50%** tout en maintenant ou améliorant les rendements (Irmak et al., 2010).
- Au Bénin, les cultures maraîchères du delta de l'Ouémé et du lac Ahémé dépendent d'une irrigation manuelle épuisante.
- En 2025, plus de **500 millions** de capteurs d'humidité sol IoT seront déployés dans le monde (IDC, 2023).

Question centrale

Comment un système d'optimisation combinant données météo, capteurs sol et modèles hydrologiques peut-il décider automatiquement quand et combien irriguer ?

Le bilan hydrique du sol — Fondement de l'irrigation raisonnée

Définition

Le **bilan hydrique** du sol quantifie les entrées (pluie, irrigation) et les sorties (évapotranspiration, drainage, ruissellement) d'eau dans la zone racinaire pour déterminer le niveau de stress hydrique de la culture.

Équation du bilan hydrique journalier :

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \frac{P_t + I_t - ET_{a,t} - D_t - R_t}{\Delta z}$$

Variable	Signification
θ	Humidité volumique du sol (m ³ /m ³)
P	Précipitations (mm/jour)
I	Eau d'irrigation apportée (mm/jour)
ET_a	Évapotranspiration réelle (mm/jour)
D	Drainage profond (mm/jour)

Coefficient cultural K_c et évapotranspiration réelle

Évapotranspiration réelle (FAO-56, Allen et al., 1998) :

$$ET_a = K_s \cdot K_c \cdot ET_0$$

- ET_0 : évapotranspiration de référence (Penman-Monteith)
- K_c : coefficient cultural (varie selon le stade phénologique)
- K_s : coefficient de stress hydrique $\in [0, 1]$ (1 = pas de stress)

$$K_s = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta \geq \theta_p \\ \frac{\theta - \theta_{wp}}{\theta_p - \theta_{wp}} & \text{si } \theta_{wp} < \theta < \theta_p \end{cases}$$

θ_p = point de flétrissement limite, θ_{wp} = point de flétrissement permanent.

Décision d'irrigation :

$$I_t = \max(0, \text{RAW} - (\theta_t - \theta_{wp}) \cdot \Delta z)$$

où RAW (Readily Available Water) est l'eau facilement extractible par la plante.

Optimisation stochastique de l'irrigation

Problème d'optimisation sur l'horizon de planification T :

$$\max_{\{I_t\}_{t=1}^T} \mathbb{E} \left[\sum_{t=1}^T (P_Y \cdot \Delta Y_t(I_t) - P_W \cdot I_t) \right]$$

sous les contraintes :

$$\theta_{wp} \leq \theta_t \leq \theta_{fc} \quad \forall t, \quad I_t \geq 0 \quad \forall t$$

Programmation dynamique stochastique (Bellman, 1957) :

$$V_t(\theta_t) = \max_{I_t} [r_t(\theta_t, I_t) + \gamma \cdot \mathbb{E}_{\theta_{t+1}} [V_{t+1}(\theta_{t+1})]]$$

Résultat

L'optimisation dynamique de l'irrigation réduit la consommation d'eau de **25–40%** par rapport à l'irrigation calendaire fixe, avec un maintien ou une augmentation du rendement (Pereira et al., 2002).

Cas pratique : système d'irrigation IoT au Bénin

Cultures maraîchères périurbaines de Cotonou

Les maraîchers de la vallée de l'Ouémé et des périmètres irrigués de Kpanroun (Bénin) pratiquent une irrigation manuelle 2 fois/jour épuisante, coûteuse et souvent inadaptée aux besoins réels des cultures.

Architecture d'un système IoT d'irrigation intelligent :

- ① **Capteurs** : humidité sol (Decagon 5TE), T° , luminosité, pluviomètre → transmission LoRa 2 km
- ② **Passerelle** (Raspberry Pi) : collecte et pré-traitement local
- ③ **Cloud** : calcul ET_0 + bilan hydrique + prévision météo 3 jours
- ④ **Algorithme de décision** : optimisation I_t par DP ou règle experte
- ⑤ **Actionneur** : électrovanne + SMS d'alerte à l'agriculteur

Economies attendues : Réduction de **35%** de la consommation d'eau + gain de **15–20%** de rendement (tomate, piment, légumes feuilles) selon expériences similaires IWMI en Afrique de l'Ouest (IWMI, 2021).

Synthèse

L'irrigation de précision pilotée par des algorithmes hydrologiques et des capteurs IoT permet de résoudre simultanément les enjeux de pénurie hydrique, de productivité agricole et d'adaptation au changement climatique. Pour l'Afrique, cette technologie est particulièrement stratégique dans un contexte de variabilité pluviométrique croissante.

Perspectives pour le Bénin :

- Déploiement de kits IoT irrigations low-cost (< 150 \$/ha) pour les maraîchers de l'Ouémé
- Réseau de stations agro-météo automatiques (ASECNA++) pour améliorer les prévisions locales
- Application mobile de conseil en irrigation en fon et en bariba
- Formation des ingénieurs agronomes béninois au numérique agricole (EPAC, FSA/UAC)

« L'eau est la denrée la plus précieuse du XXI^e siècle. Les algorithmes peuvent nous apprendre à ne plus en gaspiller une seule goutte. »

Références bibliographiques

-  Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration — FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO.
-  Pereira, L. S., Oweis, T., & Zairi, A. (2002). Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, 57(3), 175–206.
-  Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press.
-  Irmak, A., Kamble, B., & Irmak, S. (2010). Evapotranspiration data assimilation with genetic algorithms. *Irrigation Science*, 28, 101–119.
-  International Water Management Institute. (2021). *Smart water management for smallholder irrigation in West Africa*. IWMI Research Report.
-  FAO. (2020). *The State of Food and Agriculture 2020 : Overcoming water challenges in agriculture*. FAO.

Merci pour votre attention

Pinel Baudelaire T. DAHOUI

Data Scientist & IA | Ingénieur en Travaux Statistiques

`tpineldahoui@gmail.com | github.com/Baudelaire12`

LinkedIn : @Pinel Baudelaire DAHOUI

Série STEM au Quotidien — 40 jours