Aqualone — Pilotage de l'irrigation par atmomètre pesé

Nov 27, 2026 · @Bernie

Livret méthodologique : principe physique, algorithmes et protocole de validation proposé. Aucun résultat expérimental n'est présenté ici.

Résumé

Aqualone pilote l'irrigation à partir d'une mesure directe de la demande évaporative : l'eau perdue par une coupelle en céramique poreuse, pesée en continu sur la parcelle. Trois mécanismes s'appuient sur cette mesure. Le déclenchement climatique arrose quand la coupelle s'est vidée par évaporation. La condition pluviométrique annule un cycle programmé tant que la pluie a rempli la coupelle, puis le réautorise dès que l'évaporation l'a ramenée sous le seuil. La modulation ETR ajuste la durée d'un cycle programmé selon la température et l'humidité de l'air des 12 dernières heures.

À notre connaissance, aucun système commercial ne combine ces trois fonctions sur un même capteur de terrain, relié sans fil à un contrôleur autonome. Ce livret décrit la physique, les algorithmes et les réglages par défaut, puis propose un protocole pour mesurer les économies d'eau et l'effet sur les cultures.

Contexte

Le besoin en eau d'une culture suit la demande évaporative de l'atmosphère, pas l'horloge. La méthode de référence FAO-56 calcule une évapotranspiration de référence ET0 (Penman-Monteith) à partir du rayonnement, de la température, de l'humidité et du vent, puis l'ajuste par un coefficient cultural Kc (FAO-56).

Cette demande varie fortement. À Nouméa, l'évapotranspiration potentielle (Penman) normale 2001-2020 passe de 89 mm en juin (environ 3,0 mm/jour) à 185 mm en décembre (environ 6,0 mm/jour) (Météo-France, fiche climatologique 98818001). Un programme horaire fixe réglé pour la saison chaude arrose donc environ deux fois trop en saison fraîche, et l'inverse.

Deux familles d'outils répondent déjà à ce problème :

- **Les atmomètres** (type ETgage) : une plaque de céramique poreuse alimentée par un réservoir gradué, lue à la main, qui estime l'ET0 (University of Nebraska-Lincoln, G1579).
- **Les contrôleurs « météo »** : ils ajustent l'arrosage à partir d'une station locale ou de données météo en ligne (US Bureau of Reclamation, revue technique 2018).

Aqualone automatise le premier principe (une mesure physique de l'évaporation sur site) et l'utilise directement comme déclencheur, comme détecteur de pluie efficace et, combiné à un capteur d'air, comme modulateur de durée.

Le capteur Aqualone : atmomètre à céramique poreuse pesé

Le nœud Aqualone mesure la hauteur d'eau d'une coupelle en céramique poreuse par pesée, sans lecture manuelle. La céramique perd de l'eau par évaporation à sa surface, comme une feuille ; elle en gagne quand il pleut.

Élément	Rôle
Coupelle en céramique poreuse	Surface évaporante exposée aux mêmes conditions que la culture
Cellule de charge	Pesée continue de l'ensemble coupelle + eau
Électrovanne de remplissage	Remet la coupelle à niveau à chaque cycle déclenché
Capteur d'air (température, humidité)	Alimente la modulation ETR
Radio LoRaWAN	Transmet les mesures à la passerelle du site, dans un rayon d'environ 2 km

La hauteur d'eau se déduit du poids :

```
h [mm] = (P – P0) / r
```

P est le poids mesuré (g), P0 le poids à vide relevé au tarage (g), r le rapport de conversion (g/mm). Le rapport r vaut la surface d'eau en cm² divisée par 10 : 1 mm d'eau sur 1 cm² pèse 0,1 g. Sur le site de démonstration, un poids étalon de 42,50 g a donné 7,31 mm, soit r = 5,81 g/mm, ce qui correspond à une surface d'environ 58 cm².

La mesure est donc directement exprimée en millimètres d'eau, l'unité de l'ET0 et de la pluie. Le capteur transmet aussi la température et l'humidité de l'air, à 100ème de degré et de point près dans la trame.

Trois mécanismes de pilotage

Les trois mécanismes utilisent la même mesure, la hauteur d'eau de la coupelle, et s'appliquent par région d'arrosage.

1. Déclenchement climatique

L'arrosage part quand la coupelle s'est vidée par évaporation, quelle que soit l'heure.

1. Le contrôleur surveille la hauteur d'eau h.
2. Quand h passe sous 1 mm, l'électrovanne remplit la coupelle pendant une durée réglée et les zones de la région démarrent.
3. Le cycle suivant attend que la coupelle se vide de nouveau.

La durée de remplissage fixe le volume remis dans la coupelle, donc la quantité d'évaporation cumulée entre deux arrosages. Par temps chaud et sec, la coupelle se vide vite et les arrosages se rapprochent ; par temps couvert, ils s'espacent.

2. Programme horaire + condition pluviométrique

Un cycle programmé à heure fixe est annulé si la coupelle contient encore assez d'eau, puis automatiquement réautorisé quand elle s'est vidée.

1. À l'heure de départ, le contrôleur lit h.
2. Si h est supérieur ou égal au seuil d'annulation réglé, le cycle n'a pas lieu : la pluie récente a déjà couvert la demande.
3. Sinon, le cycle part normalement.

Aucune remise à zéro manuelle n'est nécessaire. Après une pluie, l'évaporation fait redescendre h ; dès qu'il passe sous le seuil, le prochain départ programmé est autorisé. Contrairement à un pluviomètre à seuil, la coupelle intègre pluie et évaporation : une averse suivie d'une journée chaude ne bloque pas l'arrosage aussi longtemps qu'une averse suivie d'un temps couvert.

3. Modulation ETR

Sur les programmes horaires de type climatique, la durée de chaque cycle est multipliée par un coefficient calculé sur la température et l'humidité moyennes de l'air pendant les 12 heures précédant le départ.

```
c = 1 + kT × (T − Tref) − kH × (H − Href), avec 0,70 ≤ c ≤ 1,40
```

La fenêtre de 12 heures correspond à un arrosage du soir : elle couvre la journée qui vient de s'écouler. Elle est réglable. Le coefficient n'est calculé que si au moins un tiers de la fenêtre (3 heures minimum) contient des mesures ; sinon la durée de référence s'applique.

Paramètre	Valeur par défaut	Justification
Tref	27 °C	Conditions où la durée programmée s'applique telle quelle
Href	65 %	Idem
kT	2,5 %/°C	Sensibilité de l'ET0 de Hargreaves (FAO-56, éq. 52) : environ +2,1 à +2,6 %/°C
kH	0,3 %/point d'humidité	Ordre de grandeur des coefficients de sensibilité de Penman-Monteith à l'humidité
Bornes	70 % – 140 %	Limite l'effet d'une mesure aberrante
Fenêtre	12 h	Journée précédant un arrosage du soir
Activation	Désactivée	Activée par l'installateur, région par région

Exemples avec les valeurs par défaut :

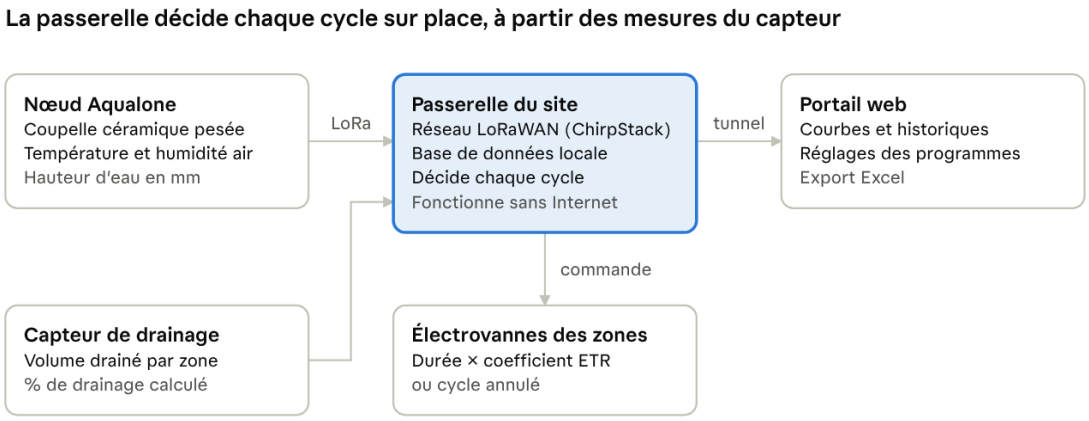
Température moyenne	Humidité moyenne	Coefficient	Cycle de 10 min
32 °C	50 %	117 %	11 min 42 s
30 °C	65 %	107,5 %	10 min 45 s

Température moyenne	Humidité moyenne	Coefficient	Cycle de 10 min
27 °C	65 %	100 %	10 min
26,9 °C	81 %	95 %	9 min 30 s
24 °C	65 %	92,5 %	9 min 15 s
22 °C	90 %	80 %	8 min

La ligne 26,9 °C / 81 % correspond à un calcul effectivement observé sur le site de démonstration. Le coefficient appliqué est enregistré à chaque cycle, ce qui permet de l'auditer a posteriori.

Architecture

Toutes les décisions d'arrosage sont prises par la passerelle du site, sans dépendre d'Internet ni d'un service distant.



architecture · du capteur au portail

Le portail sert à consulter et à régler ; une coupure du lien vers le portail n'interrompt pas l'arrosage. Le capteur de drainage ferme la boucle : il compare l'eau drainée à l'eau appliquée et affiche le pourcentage de drainage de chaque zone, ce qui permet de vérifier que les durées ne sont ni trop courtes ni trop longues.

Limites et hypothèses

La coupelle mesure une évaporation de surface libre humide, pas la transpiration d'une culture donnée. Le passage à la culture repose sur le réglage de la durée de remplissage et des durées d'arrosage par l'installateur, qui joue le rôle du coefficient cultural Kc.

- **Coefficients de la modulation ETR** : kT et kH proviennent d'analyses de sensibilité publiées (Hargreaves, Penman-Monteith), pas d'une calibration sur site. La formule ignore le

rayonnement et le vent, qui pèsent dans l'ET0. Hargreaves sous-estime l'ET0 de Nouméa d'un facteur proche de 1,4, et la FAO met en garde contre son usage en milieu insulaire.
- **Représentativité du capteur** : la coupelle doit être placée dans les mêmes conditions d'ensoleillement et de vent que la culture. Une coupelle à l'ombre ou abritée sous-estime la demande.
- **Entretien de la céramique** : l'encrassement (calcaire, algues, poussière) réduit l'évaporation. Une dérive lente du rapport entre évaporation mesurée et ET0 de référence peut en être le signe.
- **Métrologie de la pesée** : la précision dépend de la cellule de charge, de sa dérive thermique et de la qualité du tarage. Un tarage refait à vide et un contrôle au poids étalon sont recommandés à l'installation.
- **Pluie intense** : au-delà de la capacité de la coupelle, l'eau déborde et la hauteur mesurée plafonne. C'est voulu : le seuil d'annulation est atteint bien avant, et la pluie totale n'est pas nécessaire au pilotage.
- **Condition instantanée** : l'annulation est décidée à l'heure de départ, sur la dernière mesure reçue. Une pluie qui tombe pendant le cycle ne l'interrompt pas.

Protocole de validation proposé

Nous proposons une comparaison en blocs appariés sur une saison complète, ouverte aux équipes de recherche et aux producteurs partenaires.

1. **Dispositif** : au moins deux régions d'arrosage identiques (même culture, sol, gouteurs, exposition), répétées si possible en trois blocs. Traitement A : programme horaire fixe réglé par le producteur. Traitement B : pilotage Aqualone (condition pluviométrique + modulation ETR, ou déclenchement climatique).
2. **Référence météo** : station sur site ou à proximité immédiate, pour calculer l'ET0 Penman-Monteith journalière (FAO-56) et la comparer à l'évaporation mesurée par la coupelle.
3. **Mesures d'eau** : volumes appliqués par région (débitmètre ou durée × nombre de goutteurs × débit), drainage mesuré par bac de collecte, humidité du sol à deux profondeurs.
4. **Mesures agronomiques** : rendement commercialisable, calibre, indicateurs de stress (potentiel hydrique foliaire ou indice de végétation), incidence de maladies liées à l'excès d'eau.
5. **Indicateurs** : volume total appliqué, fraction de drainage, efficience d'usage de l'eau (rendement par m^3), nombre de cycles annulés après pluie, écart entre évaporation de la coupelle et ET0.
6. **Analyse** : comparaison des traitements par modèle mixte (bloc en effet aléatoire), et régression de l'évaporation mesurée sur l'ET0 pour estimer un coefficient de coupelle propre au site.

Le système enregistre déjà la hauteur d'eau, la température et l'humidité de l'air, les cycles réalisés ou annulés, le coefficient ETR appliqué et le pourcentage de drainage. Ces données sont exportables au format Excel depuis le portail.

Perspectives

- **Calibration locale de kT et kH** : par régression de l'évaporation de la coupelle sur T et H, une fois quelques mois de données acquis sur un site.

- **Hargreaves calibré** : remplacer la formule linéaire par une ET0 de Hargreaves corrigée localement (facteur proche de 1,4 à Nouméa), lorsque les températures minimales et maximales journalières sont disponibles.
- **Coefficients culturaux** : intégrer un Kc par stade de culture pour passer de la demande évaporative au besoin de la plante.
- **Boucle de drainage** : ajuster automatiquement les durées pour viser une fraction de drainage cible, mesurée par le capteur de drainage déjà disponible.

Références

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. Chapitres utilisés : équation de Penman-Monteith, données météorologiques et équation de Hargreaves (éq. 52).
2. Météo-France. Fiche climatologique Nouméa 98818001, ETP Penman normale 2001-2020.
3. University of Nebraska-Lincoln Extension. *Using Modified Atmometers (ETgage) for Irrigation Management*, G1579.
4. US Bureau of Reclamation (2018). *Weather- and Soil Moisture-Based Landscape Irrigation Scheduling Devices*, Technical Review Report, 6e édition.
5. Atmometer, Wikipedia (principe et historique).