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 IV : Pilotage de l'irrigation : du conventionnel au numérique

MODULE : GESTION ET PILOTAGE DE L'IRRIGATION

Objectifs pédagogiques du chapitre

- Maîtriser les trois grandes familles d'indicateurs de pilotage de l'irrigation dans le continuum Sol–Plante–Atmosphère (climat, sol, plante).
- Comprendre l'apport des outils numériques (stations météorologiques automatiques, télédétection satellitaire Sentinel-2 et WaPOR, sondes capacitives connectées IoT, thermométrie infrarouge) pour le pilotage de précision.
- Savoir interpréter les grandeurs physiques et physiologiques clés (NDVI, potentiel matriciel, teneur en eau volumique, indice de stress hydrique CWSI).
- Concevoir et justifier des stratégies d'irrigation déficitaire (RDI et PRD) adaptées aux contextes de rareté hydrique et de salinité afin de maximiser l'efficience d'utilisation de l'eau (WUE).

Introduction

L'agriculture irriguée représente entre 70 % et 80 % des prélèvements mondiaux d'eau douce, une proportion particulièrement critique dans les régions arides et semi-arides méditerranéennes où le changement climatique accentue la fréquence des sécheresses et la pression sur les ressources mobilisables (Fereres & Soriano, 2007). Historiquement, le pilotage de l'irrigation s'est appuyé sur des approches empiriques ou calendaires (tours d'eau fixes, observation visuelle du flétrissement), qui conduisent systématiquement soit à une sur-irrigation (pertes par percolation profonde, lessivage des nitrates, asphyxie racinaire, coûts énergétiques excessifs), soit à une sous-irrigation tardive pénalisant irréversiblement le rendement (Jones, 2004).

Le passage du pilotage conventionnel au pilotage numérique repose sur une lecture instrumentée du continuum Sol–Plante–Atmosphère (SPA) permettant de répondre en temps réel à deux questions opérationnelles fondamentales : **« Quand irriguer ? »** (déclenchement) et **« Combien apporter ? »** (dose). L'intégration conjointe de la télédétection spatiale, des réseaux de capteurs connectés (Internet des Objets — IoT) et des stratégies d'irrigation déficitaire constitue aujourd'hui le socle de l'irrigation de précision (Abioye et al., 2020).

4.1. Pilotage par le climat : stations météorologiques automatiques et données satellitaires (NDVI)

4.1.1. Stations météorologiques automatiques (SMA) et estimation de la demande climatique

Le pilotage par le climat repose sur la quantification de la demande évaporative de l'atmosphère et le calcul du bilan hydrique prévisionnel selon le formalisme de la FAO-56 (Allen et al., 1998). Une station météorologique automatique (SMA) agricole enregistre en continu (pas de temps horaire ou journalier) les quatre variables climatiques indispensables au calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_o) par l'équation combinée de Penman-Monteith :

- La température de l'air (T_{min}, T_{max}, T_{moy} en °C) ;
- L'humidité relative de l'air (HR en %), permettant le calcul du déficit de pression de vapeur (VPD) ;
- Le rayonnement solaire global incident (R_s en MJ/m^2/jour) mesuré par pyranomètre ;
- La vitesse du vent à 2 mètres de hauteur (u_2 en m/s) mesurée par anémomètre, complétée par un pluviomètre à augets basculeurs pour mesurer la pluie locale.

À partir d'ET_o, les besoins en eau de la culture en conditions standard (ET_c) sont estimés par la relation à coefficient cultural unique :

$$ET_c = ET_o \times K_c \tag{4.1}$$

Dans l'approche à double coefficient cultural, qui sépare la transpiration végétale de l'évaporation du sol nu, la relation s'écrit (Allen et al., 1998) :

$$ET_c = ET_o \times (K_{cb} + K_e) \tag{4.2}$$

où K_{cb} est le coefficient cultural basal (lié à la transpiration du couvert) et K_e le coefficient d'évaporation du sol.

Limites du pilotage climatique seul : bien que rigoureux pour estimer la dose théorique à apporter, le pilotage climatique pur utilise des valeurs de K_c tabulées qui supposent une culture homogène, saine et sans stress. Sur le terrain, les aléas thermiques, les densités de semis hétérogènes, les carences nutritionnelles ou les attaques phytosanitaires décalent fortement la phénologie réelle par rapport aux tables standards. De plus, les erreurs cumulatives du bilan hydrique imposent un recalage périodique par des mesures *in situ* ou satellitaires (Jones, 2004).

4.1.2. Intégration des données satellitaires : l'indice de végétation NDVI et le calage dynamique de K_c

La télédétection optique multispectrale permet de lever l'incertitude liée aux coefficients culturaux théoriques en observant directement l'état biophysique réel du couvert végétal à l'échelle intraparcellaire (Calera et al., 2017). L'indicateur opérationnel le plus répandu est l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI — *Normalized Difference Vegetation Index*), calculé à partir des réflectances de surface dans le rouge (R) et le proche infrarouge (PIR) :

$$\mathrm{NDVI} = \frac{PIR - R}{PIR + R} \tag{4.3}$$

Principe physique : la chlorophylle des feuilles saines absorbe fortement le rayonnement dans le spectre rouge (faible réflectance R), tandis que la structure cellulaire du mésophylle réfléchit intensément le proche infrarouge (forte réflectance PIR). Le NDVI varie théoriquement de −1 à +1 : un sol nu présente généralement un NDVI compris entre 0,10 et 0,20, tandis qu'un couvert végétal dense et actif atteint des valeurs de 0,70 à 0,90.

Relation K_c–NDVI : de nombreuses études lysimétriques et satellitaires ont démontré l'existence d'une relation linéaire robuste entre le NDVI et le coefficient cultural basal (K_{cb}) ou global (K_c), avec des coefficients de détermination (R^2) fréquemment compris entre 0,79 et 0,97 (Calera et al., 2017 ; López Hernández et al., 2026) :

$$K_{cb} = a \times \mathrm{NDVI} + b \tag{4.4}$$

À titre illustratif, des calibrations génériques largement utilisées pour les cultures annuelles s'approchent de $K_{cb} \approx 1{,}25 \times NDVI - 0{,}20$, à ajuster selon l'espèce cultivée et le capteur. Cette approche « basée sur la réflectance » suit automatiquement les avances ou retards phénologiques réels, révèle l'hétérogénéité spatiale intraparcellaire (zones de faible vigueur ou de salinité) et actualise le bilan hydrique FAO-56 en quasi temps réel. En revanche, elle souffre de la saturation du NDVI pour les couverts très denses (indice foliaire LAI supérieur à 3–4), de la sensibilité à la couverture nuageuse et du fait que le NDVI traduit la biomasse verte déjà constituée plutôt que la fermeture stomatique immédiate.

4.1.3. Plateformes opérationnelles de télédétection : Sentinel-2 et FAO WaPOR

Deux écosystèmes gratuits et institutionnels structurent aujourd'hui le pilotage satellitaire de l'irrigation :

1. **La constellation Sentinel-2 (programme européen Copernicus, ESA) :** fournit des images multispectrales à haute résolution spatiale (10 m dans les bandes Rouge B4 et PIR B8) avec une fréquence de revisite de 5 jours, idéale pour générer des séries temporelles de NDVI à l'échelle de la parcelle agricole et détecter la variabilité intraparcellaire (Calera et al., 2017).
2. **Le portail FAO WaPOR (*Water Productivity through Open access of Remotely sensed derived data*) :** développé par la FAO, ce portail fournit en libre accès des cartes décadaires d'évapotranspiration réelle (ET_a), de transpiration, de production de biomasse et de productivité de l'eau sur l'Afrique et le Proche-Orient (incluant l'Algérie), aux résolutions continentale (250 m), nationale (100 m) et sub-nationale (30 m) grâce à des modèles de bilan d'énergie et de télédétection (FAO, 2020).

Complémentarité : à l'échelle des très petites exploitations ou pour la recherche de précision, les drones (UAV) équipés de caméras multispectrales et thermiques complètent Sentinel-2 en s'affranchissant des nuages et en atteignant des résolutions centimétriques. Par ailleurs, les modèles de bilan d'énergie de surface (tels que SEBAL ou METRIC, exploitant le thermique satellitaire Landsat) permettent d'estimer directement l'évapotranspiration réelle ET_a sans passer par un bilan hydrique du sol.

Tableau 1. Synthèse comparative des outils de pilotage par le climat et la télédétection

Outil / Plateforme	Variables mesurées ou dérivées	Résolution spatiale et temporelle	Principaux atouts	Limites opérationnelles
Station météo automatique (SMA)	T, HR, R_s, u_2, Pluie → ET_o (Penman-Monteith)	Ponctuelle (rayon de quelques km) ; horaire / journalière	Calcul précis d'ET_o et de la dose prévisionnelle ; temps réel	Dépend des K_c tabulés ; ne capte pas l'hétérogénéité intraparcellaire ; entretien des capteurs requis
Sentinel-2 (Optique / NDVI)	Bandes B4 (Rouge) et B8 (PIR) → NDVI, K_{cb}	10 m ; revisite 5 jours	Gratuit, suivi réel de la phénologie et de l'hétérogénéité parcellaire	Bloqué par les nuages ; saturation du NDVI à fort LAI ; détection tardive du stress aigu
Portail FAO WaPOR	ET_a, Transpiration, Biomasse, Productivité de l'eau	250 m / 100 m / 30 m ; décadaire	Couverture directe de l'Afrique du Nord, suivi des périmètres irrigués sans modèle local lourd	Résolution temporelle (10 jours) trop grossière pour le déclenchement journalier fin en maraîchage
Drone (UAV multispectral)	NDVI, indices de végétation haute résolution	Centimétrique (2–10 cm) ; à la demande	Insensible aux nuages, précision extrême sur vergers (séparation arbre / sol nu)	Coût d'acquisition et d'exploitation, réglementation aérienne, faible autonomie sur grandes surfaces

4.2. Pilotage par le sol : tensiométrie et sondes capacitives (FDR) connectées

Le pilotage par le sol consiste à suivre directement l'état de remplissage du « réservoir sol » dans la zone racinaire. Deux grandeurs physiques complémentaires mais distinctes doivent être impérativement différenciées : le **potentiel matriciel** (force de rétention de l'eau) et la **teneur en eau volumique** (quantité d'eau présente).

4.2.1. La tensiométrie : mesure de la force d'extraction racinaire

Principe physique : un tensiomètre ne mesure pas un volume d'eau, mais le potentiel matriciel du sol (exprimé en kilopascals, kPa, ou en centibars, cb, avec 1 kPa = 1 cb), c'est-à-dire l'effort de succion que doivent exercer les racines pour arracher l'eau retenue par capillarité dans les pores du sol. Plus le sol s'assèche, plus la valeur absolue de la tension augmente. On distingue deux grandes technologies de terrain :

- **Les tensiomètres hydrauliques à bougie poreuse en céramique :** constitués d'un tube rempli d'eau dégazée relié à un manomètre ou un capteur de pression électronique. Ils sont très précis dans la gamme humide (0 à 80 cb), ce qui les rend idéaux en maraîchage et sols sableux, mais décrochent par cavitation au-delà de 80–85 cb et nécessitent une purge régulière.
- **Les sondes à matrice granulaire (type Watermark) :** mesurent la résistance électrique entre deux électrodes noyées dans une matrice poreuse en équilibre hydrique avec le sol. Robustes, peu coûteuses, sans maintenance hydraulique et couvrant une plage étendue (0 à 200 cb), elles sont très répandues en grandes cultures et arboriculture, avec toutefois un temps de réponse légèrement plus lent en sol très sableux.

Protocole d'installation et stratégie de lecture en binôme : la fiabilité de la tensiométrie dépend avant tout de la qualité du contact sol–bougie (pralinage obligatoire dans une boue de terre fine, absence de poches d'air, bourrelet de terre en surface pour éviter les écoulements préférentiels le long du tube). En pratique, les sondes s'installent par paire (ou par station de 3 répétitions par profondeur) :

- **Une sonde de pilotage** (superficielle, ex. 15–30 cm) placée au cœur de la zone d'activité racinaire maximale : elle indique **« quand déclencher »** l'irrigation ;
- **Une sonde de contrôle** (profonde, ex. 45–60 cm) placée sous la zone racinaire active : elle indique **« si la dose apportée est adaptée »**. Si la tension de la sonde profonde chute fortement après chaque arrosage, la dose est excessive (risque de percolation profonde) ; si elle augmente continuellement alors que la surface reste humide, les doses sont insuffisantes et les racines profondes s'assèchent.

Tableau 2. Valeurs repères et seuils moyens de déclenchement tensiométrique selon la texture du sol et le type de culture

Plage de tension (cb ou kPa)	État hydrique du sol	Interprétation agronomique et action de pilotage
0 à 10 cb	Saturation / Excès d'eau	Sol gorgé d'eau, risque d'asphyxie racinaire et de drainage profond : ne pas irriguer.
10 à 30 cb	Capacité au champ à confort optimal	Zone idéale pour les cultures maraîchères sensibles et les sols légers (sableux).
30 à 50 cb	Seuil de déclenchement (Maraîchage / Sol sableux)	Déclenchement recommandé pour la tomate, la pomme de terre et les cultures en sol sableux (seuil moyen ≈ 40 cb).
50 à 80 cb	Seuil de déclenchement (Grandes cultures / Limoneux à argileux)	Zone d'intervention typique pour le maïs (60–80 cb) et l'arboriculture (50–80 cb) ; seuil moyen ≈ 70 cb en sol limoneux et ≈ 80–90 cb en sol argileux.
Supérieur à 100 cb	Assèchement avancé / Stress hydrique	Réserve facilement utilisable (RFU) largement épuisée ; fort risque de chute de rendement (sauf stratégie volontaire de RDI).

4.2.2. Les sondes capacitives (FDR) et électromagnétiques (TDR) : mesure volumétrique multi-profondeurs

Principe physique : contrairement au tensiomètre, les sondes électromagnétiques mesurent la teneur en eau volumique du sol (θ, en % ou en mm d'eau par mètre de sol) en exploitant la constante diélectrique (permittivité relative apparente, ε_a) du milieu. L'eau liquide possède une constante diélectrique très élevée ($\varepsilon \approx 80$ à 20 °C), alors que les particules minérales sèches du sol ont une valeur de 3 à 5 et l'air une valeur de 1. Toute variation d'humidité du sol entraîne donc une variation mesurable de la permittivité globale du milieu, convertie en teneur en eau volumique via des courbes d'étalonnage inspirées de la relation empirique fondatrice de Topp et al. (1980).

- **Les sondes capacitives FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) :** forment un condensateur dont le sol environnant constitue le diélectrique ; elles mesurent la fréquence de résonance d'un circuit oscillant pour en déduire la permittivité. Leur faible coût énergétique et leur architecture tubulaire permettent d'empiler plusieurs anneaux de mesure (tous les 10 cm jusqu'à 60, 100 ou 120 cm) au sein d'une même sonde profilométrique. Elles sont toutefois plus sensibles aux variations de salinité du sol, de température et à la présence de lames d'air autour du tube, ce qui rend un étalonnage spécifique au sol souhaitable en conditions salines.
- **Les sondes TDR (*Time Domain Reflectometry*) :** mesurent le temps de propagation d'une impulsion électromagnétique haute fréquence le long de guides d'ondes métalliques insérés dans le sol. Elles offrent une précision de référence moins sensible à la salinité et à la texture, mais leur coût plus élevé les cantonne souvent aux stations expérimentales.

4.2.3. Transmission à distance (IoT) et interprétation des graphiques de sondes capacitives

L'intégration des sondes FDR dans des architectures connectées (Internet des Objets — IoT) a transformé le pilotage parcellaire (Abioye et al., 2020). Les capteurs enfouis sont reliés à un boîtier d'acquisition alimenté par panneau solaire qui transmet les mesures toutes les 15 à 60 minutes via des réseaux bas débit longue portée (LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT) ou cellulaires (4G/GSM) vers une plateforme cloud accessible sur smartphone ou ordinateur.

Lecture agronomique des courbes capacitives (base méthodologique du TD 3) : l'observation d'un graphique d'humidité cumulée ou par horizon (10, 20, 30, 40, 60 cm) en fonction du temps révèle un profil caractéristique « en marches d'escalier » :

1. **Identification de la Capacité au Champ (H_{cc}) :** après une irrigation ou une forte pluie, la courbe monte brutalement (phase de saturation), puis redescend rapidement pendant 12 à 48 heures (drainage gravitaire). Le point d'inflexion où la pente de descente se stabilise marque exactement la Capacité au Champ (H_{cc}) du sol.
2. **Dynamique journalière de consommation racinaire :** pendant la journée, la courbe descend nettement (transpiration active) ; la nuit, elle forme un plateau horizontal (arrêt de la transpiration). Cette alternance crée les « marches d'escalier » qui confirment la présence de racines actives à cette profondeur.
3. **Identification du début de stress (fin de la RFU) et du Point de Flétrissement (H_{pf}) :** lorsque l'amplitude des marches d'escalier diurnes s'aplatit progressivement malgré un climat chaud et sec, la plante peine à extraire l'eau (épuisement de la RFU et déclenchement du stress). Si la courbe devient totalement plate jour et nuit à une valeur basse stable, le Point de Flétrissement Permanent (H_{pf}) est atteint à cet horizon.
4. **Contrôle de l'infiltration et de la percolation :** si l'horizon le plus profond (sous les racines, ex. 80–100 cm) montre un pic brusque après une irrigation, la dose appliquée était excessive et une partie de l'eau (et des engrais) a été perdue par percolation profonde.

Tableau 3. Comparaison technique des capteurs de pilotage par le sol

Critère	Tensiomètre hydraulique	Sonde granulaire (Watermark)	Sonde capacitive (FDR)	Sonde TDR
Grandeur mesurée	Potentiel matriciel (cb / kPa)	Potentiel matriciel (cb / kPa)	Teneur en eau volumique (% ou mm)	Teneur en eau volumique (% ou mm)
Plage de mesure	0 à 80 cb	0 à 200 cb	0 à 100 % saturation	0 à 100 % saturation
Sensibilité à la salinité	Nulle	Faible à modérée (CE élevée)	Modérée à élevée	Faible
Étalonnage selon le sol	Non (lecture universelle de l'effort)	Non (correction température utile)	Recommandé (pour valeur absolue)	Faible (courbe universelle de Topp)
Suivi multi-profondeurs & IoT	Possible (par capteur séparé)	Très facile et économique	Natif (profil 10 à 120 cm en un seul tube)	Coûteux
Usage privilégié	Maraîchage, serres, sols légers	Grandes cultures, vergers, pilotage de routine	Pilotage de précision connecté, suivi racinaire fin	Recherche, calibration, sols salins

4.3. Pilotage par la plante : thermométrie infrarouge (CWSI) et mesures directes sur le couvert

4.3.1. Intérêt et limites conceptuelles de l'approche centrée sur la plante

Parce que la plante subit simultanément la résistance du sol à céder l'eau et la demande évaporative de l'atmosphère, elle constitue le biocapteur intégrateur le plus fidèle du stress hydrique réel (Jones, 2004). Contrairement aux capteurs de sol qui n'échantillonnent qu'un volume minuscule et parfois peu représentatif d'une parcelle hétérogène, les mesures sur la plante traduisent l'état physiologique effectif du couvert.

Toutefois, Jones (2004) et Fernández (2017) rappellent une limite opérationnelle majeure : les indicateurs basés sur la plante répondent avec une grande finesse à la question « Quand irriguer ? » (détection du stress), mais ne fournissent pas directement la dose d'eau (en mm) à apporter pour recharger le sol. Ils doivent donc être associés à un bilan hydrique ou à un suivi du sol pour dimensionner les apports.

4.3.2. Thermométrie et thermographie infrarouge : l'Indice de Stress Hydrique des Cultures (CWSI)

Principe biophysique : une plante bien alimentée en eau maintient ses stomates ouverts ; la vaporisation de l'eau à la surface foliaire (chaleur latente de vaporisation) refroidit activement le feuillage, dont la température (T_c) demeure inférieure à la température de l'air ambiant (T_a). Dès qu'un déficit hydrique apparaît, les stomates se ferment partiellement pour limiter la déshydratation : le flux de chaleur latente chute, l'énergie solaire absorbée se convertit en chaleur sensible et la température du couvert (T_c) augmente rapidement, pouvant dépasser celle de l'air (Jackson et al., 1981 ; Jones, 2004).

Formulation du CWSI (*Crop Water Stress Index*) : la simple différence $(T_c - T_a)$ variant fortement avec l'humidité de l'air et le rayonnement, Idso et al. (1981) (approche empirique) et Jackson et al. (1981) (approche théorique basée sur le bilan d'énergie) ont normalisé cet écart entre deux bornes physiques de référence :

$$\mathrm{CWSI} = \frac{(T_c - T_a) - dT_{LL}}{dT_{UL} - dT_{LL}} \tag{4.5}$$

- T_c **:** température radiative du couvert végétal mesurée au thermomètre ou à la caméra infrarouge autour du midi solaire (13 h – 14 h 30, ciel dégagé) ;
- T_a **:** température de l'air ambiant ;
- dT_{LL} **(*Lower Limit* — Ligne de base non stressée) :** écart $(T_c - T_a)$ théorique d'une culture parfaitement irriguée transpirant à son potentiel maximal. Dans l'approche d'Idso et al. (1981), dT_{LL} est une fonction linéaire décroissante du Déficit de Pression de Vapeur (*VPD*) de l'air ;
- dT_{UL} **(*Upper Limit* — Ligne de base de stress maximal) :** écart $(T_c - T_a)$ d'un couvert totalement stressé dont les stomates sont complètement fermés (transpiration nulle).

Interprétation et évolutions modernes : le CWSI est un indice sans dimension compris entre **0** (absence totale de stress, transpiration maximale) et **1** (stress extrême, fermeture stomatique totale). En pratique opérationnelle, le déclenchement de l'irrigation intervient généralement lorsque le CWSI dépasse un seuil critique compris entre **0,20 et 0,35** pour les cultures sensibles (maraîchage, maïs) et **0,35 à 0,50** pour les cultures plus tolérantes.

Limites et solutions : la mesure par thermomètre infrarouge portable est sensible aux nuages intermittents, au vent et à la contamination du champ de vision par le sol nu très chaud (problème critique en début de cycle ou en verger). L'utilisation de caméras thermiques couplées à l'imagerie RGB (sur drone ou mât fixe) et l'emploi de surfaces de référence humide et sèche — ou les ajustements analytiques proposés par Alves & Pereira (2000) — permettent désormais d'isoler automatiquement les pixels de feuilles ensoleillées et de cartographier le CWSI à l'échelle de la parcelle entière (Jones, 2004).

4.3.3. Mesures physiologiques directes sur le couvert

En complément de la thermométrie infrarouge, trois méthodes directes de référence sont utilisées en agronomie de précision et en arboriculture (Fernández, 2017) :

1. **La chambre de pression (chambre de Scholander) :** mesure le potentiel hydrique (en MPa ou bars, valeurs négatives) de la sève dans le xylème. Deux protocoles dominent :
   - *Le potentiel hydrique foliaire de base* (mesuré avant le lever du soleil) : reflète l'équilibre entre la plante et le potentiel hydrique du sol exploré par les racines ;
   - *Le potentiel hydrique de tige à midi solaire* (mesuré sur une feuille préalablement ensachée dans un sachet opaque aluminium pendant 1 à 2 heures pour stopper sa transpiration) : considéré comme l'indicateur de référence le plus stable et sensible en arboriculture (olivier, agrumes, vigne, pêcher). Cette méthode reste toutefois destructive, manuelle et chronophage, donc impossible à automatiser en continu.
2. **Les capteurs de flux de sève (méthode thermique de Granier ou par impulsion de chaleur) :** insérés dans l'aubier du tronc ou des tiges, ils mesurent le transfert thermique transporté par la sève ascendante pour quantifier en continu la transpiration réelle de la plante (en L/jour). Ils sont automatisables mais requièrent une calibration délicate et un grand nombre de répétitions pour extrapoler à l'hectare (Fernández, 2017).

3. **La dendrométrie (capteurs LVDT de variations micrométriques du diamètre de tige/tronc) :** mesure en continu le cycle quotidien de contraction diurne (perte d'eau par transpiration) et de regonflement nocturne (réhydratation) des tissus conducteurs. Deux indicateurs en sont dérivés : la Contraction Diurne Maximale (MDS — *Maximum Daily Shrinkage*), qui augmente dès les premiers signes de contrainte hydrique, et le taux de croissance journalière du tronc (TGR). Très sensibles et compatibles avec l'IoT, les dendromètres restent sensibles aux variations de charge en fruits et à l'âge de l'arbre.

Tableau 4. Synthèse des méthodes de pilotage par la plante

Méthode / Capteur	Variable mesurée	Automatisation / Temps réel	Sensibilité au stress	Principales limites
Thermométrie / Thermographie IR	Température foliaire (T_c) → CWSI (0 à 1)	Oui (capteurs fixes ou drones thermiques)	Élevée (réaction stomatique rapide)	Sensible aux nuages, au vent et aux pixels de sol nu ; calibration des lignes de base
Chambre de pression (Scholander)	Potentiel hydrique foliaire ou de tige (MPa)	Non (mesure manuelle destructive)	Très élevée (référence scientifique)	Travail intensif, faible fréquence, non automatisable
Capteurs de flux de sève	Débit de sève / Transpiration (L/h ou L/j)	Oui (enregistrement continu + IoT)	Bonne	Coût, caractère invasif, variabilité inter-arbres, calibration complexe
Dendrométrie (LVDT)	Variations micrométriques du tronc (MDS, TGR)	Oui (enregistrement continu + IoT)	Très précoce	Interprétation délicate selon la phénologie et la charge en fruits ; capteur délicat à fixer

4.4. Stratégies d'irrigation déficitaire : RDI et PRD

4.4.1. Changement de paradigme : de la maximisation du rendement à la productivité de l'eau

Dans les régions soumises à une pénurie hydrique structurelle, l'objectif de l'irrigation évolue : il ne s'agit plus nécessairement de maximiser le rendement par unité de surface (t/ha) en couvrant 100 % de l'ET_c, mais de maximiser la productivité de l'eau (CWP ou WUE, en kg de produit récolté par m^3 d'eau consommé) et le revenu net par m^3 d'eau mobilisé (Fereres & Soriano, 2007 ; Geerts & Raes, 2009).

L'irrigation déficitaire repose directement sur la non-linéarité de la réponse des cultures au stress hydrique selon les stades phénologiques — exprimée par le facteur de réponse du rendement K_y de la FAO-33 vu au Chapitre III (Doorenbos & Kassam, 1979 ; Steduto et al., 2012). Deux stratégies avancées dominent la pratique moderne : l'Irrigation Déficitaire Régulée (RDI) et le Séchage Partiel des Racines (PRD).

4.4.2. L'Irrigation Déficitaire Régulée (RDI — *Regulated Deficit Irrigation*)

Origine et principe : développée initialement en Australie sur vergers de pêchers par Chalmers et al. (1981), la RDI consiste à appliquer volontairement des apports d'eau inférieurs aux besoins optimaux (ET_c) uniquement durant des phases phénologiques peu sensibles au stress hydrique (où $K_y < 1$), tout en assurant une alimentation hydrique complète (100 % de l'ET_c) pendant les phases critiques déterminant le nombre et la taille des organes récoltés — floraison, nouaison, remplissage des grains ou grossissement rapide des fruits, où $K_y \geq 1$ (Fereres & Soriano, 2007 ; Geerts & Raes, 2009).

- **Arboriculture fruitière (pêcher, olivier, agrumes, vigne) :** une restriction modérée (ex. 50 % de l'ET_c) durant le stade II de durcissement du noyau chez le pêcher ou en période estivale de croissance végétative ralentit la pousse excessive des rameaux sans réduire le calibre final du fruit, réduisant simultanément les coûts de taille et les consommations d'eau de 20 % à 30 % (Chalmers et al., 1981).
- **Tomate industrielle :** un déficit contrôlé en phase de maturation ($K_y \approx 0{,}40$) permet d'économiser l'eau tout en augmentant la concentration en sucres solubles (degré Brix) et en matière sèche des fruits.
- **Céréales (blé, maïs) :** protection stricte de la montaison–floraison, avec économie possible en phase végétative précoce ou en fin de maturation.

Conditions de réussite et risques : la RDI exige une connaissance fine de la phénologie, un système d'irrigation performant (goutte-à-goutte) et un suivi par capteurs (sol ou plante) pour éviter que le stress ne franchisse un seuil irréversible. En zones arides et semi-arides, l'application prolongée de la RDI sans lessivage périodique accroît le risque d'accumulation des sels dans la zone racinaire (Geerts & Raes, 2009).

4.4.3. Le Séchage Partiel des Racines (PRD — *Partial Rootzone Drying*)

Principe physiologique (signalisation hormonale à l'ABA) : conceptualisée sur vigne puis généralisée à de nombreuses cultures maraîchères et fruitières (Dry et al., 2000 ; Kang & Zhang, 2004), la technique PRD divise artificiellement le système racinaire de chaque plante en deux zones hydriques contrastées :

- **Une moitié des racines est irriguée normalement :** elle assure l'alimentation en eau des parties aériennes, maintenant ainsi la turgescence cellulaire et le potentiel hydrique foliaire à des niveaux proches de la normale ;
- **Simultanément, l'autre moitié des racines est volontairement laissée en phase de dessèchement :** ce stress localisé déclenche la synthèse racinaire d'une hormone de stress, l'acide abscissique (ABA), qui migre via la sève xylémienne jusqu'aux feuilles. Ce signal chimique induit une fermeture partielle des stomates, réduisant fortement la perte d'eau par transpiration tandis que la photosynthèse (et donc la production de biomasse) est beaucoup moins affectée (Kang & Zhang, 2004).

Mécanisme d'alternance obligatoire : si la même moitié des racines reste sèche trop longtemps, sa capacité à produire de l'ABA s'épuise et les racines fines se subérisent. Il est donc impératif d'inverser les côtés irrigué et sec de manière cyclique (généralement tous les 10 à 15 jours selon le type de sol et la demande climatique) afin de réactiver la synthèse d'ABA dans l'autre moitié du système racinaire (Kang & Zhang, 2004).

Mise en œuvre au champ et bénéfices : le PRD nécessite un dispositif hydraulique permettant l'alternance, tel que deux rampes goutte-à-goutte parallèles commandées par des vannes indépendantes de part et d'autre du rang, ou l'irrigation par sillons alternés (un sillon sur deux). Selon Kang & Zhang (2004) et Jones (2004), le PRD permet des économies d'eau de 30 % à 50 % avec des baisses de rendement très limitées (souvent inférieures à 10 %), une meilleure efficience d'utilisation de l'eau (WUE), une réduction de la vigueur végétative excessive et une amélioration fréquente de la qualité des fruits (teneur en sucres, polyphénols). En outre, l'ajustement du pilotage y est parfois moins risqué qu'en RDI car la plante dispose en permanence d'une fraction racinaire hydratée (Jones, 2004).

Tableau 5. Comparaison synthétique des stratégies d'irrigation déficitaire (RDI vs PRD)

Caractéristique	Irrigation Déficitaire Régulée (RDI)	Séchage Partiel des Racines (PRD)
Principe opératoire	Réduction temporelle des doses d'eau durant les stades peu sensibles ($K_y < 1$)	Irrigation spatialement alternée d'une moitié du système racinaire (cycles de 10–15 jours)
Mécanisme physiologique dominant	Stress hydrique global contrôlé, évitant les stades reproductifs critiques	Signalisation chimique racinaire (acide abscissique — ABA) induisant une fermeture stomatique partielle tout en maintenant la turgescence
Infrastructure hydraulique requise	Système d'irrigation classique (goutte-à-goutte simple rampe, aspersion)	Double rampe goutte-à-goutte avec vannes indépendantes, ou sillons alternés (surcoût d'installation)
Économies d'eau typiques	15 % à 35 % selon l'espèce et le climat	30 % à 50 % (réduction de la transpiration sans effondrement photosynthétique)
Exigence de suivi / Risque majeur	Suivi fin indispensable (sol/plante) ; risque de chute brutale de rendement si le déficit déborde sur une phase sensible	Risque d'échec en sol très sableux (mauvaise séparation latérale des bulbes) ou si l'alternance est trop lente
Cultures de prédilection	Arboriculture fruitière, vigne, tomate industrielle, céréales	Vigne, tomate, pomme de terre, agrumes, olivier, maïs en sillons alternés

4.5. Synthèse : vers un pilotage intégré et hybride (Agriculture 4.0)

Aucune des trois approches (climat, sol, plante) prise isolément n'est autosuffisante dans toutes les situations agricoles. L'état de l'art en irrigation de précision converge aujourd'hui vers des Outils d'Aide à la Décision (OAD) hybrides combinant ces sources complémentaires (Abioye et al., 2020 ; Calera et al., 2017) :

1. **Le couple Climat (SMA) + Satellite (Sentinel-2 / WaPOR)** fournit la vision globale de la parcelle, le suivi dynamique du coefficient cultural (via le NDVI) et le calcul de la dose d'irrigation prévisionnelle (en mm).
2. **Les capteurs de sol connectés (sondes capacitives FDR / tensiomètres IoT)** assurent le suivi continu en temps réel du stock racinaire, recalent le bilan hydrique et contrôlent l'absence de drainage profond.
3. **Les indicateurs plante (CWSI par drone thermique, potentiel de tige ou dendrométrie)** valident l'état physiologique réel du couvert et sécurisent l'application des stratégies d'irrigation déficitaire (RDI et PRD).

Passerelle avec les Travaux Dirigés du module : les notions développées dans ce chapitre sont directement mises en pratique lors du **TD 3** (interprétation de graphiques multi-profondeurs issus de sondes capacitives pour déterminer la Capacité au Champ et le Point de Flétrissement) et du **TD 4** (initiation à la télédétection avec Sentinel-2 et FAO WaPOR pour évaluer l'évolution du couvert végétal et les besoins en eau).

Références bibliographiques (Norme APA, 7e éd.)

Abioye, E. A., Abidin, M. S. Z., Mahmud, M. S. A., Buyamin, S., Ishak, M. H. I., Rahman, M. K. I. A., Otuoze, A. O., Onotu, P., & Ramli, M. S. A. (2020). A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, *173*, 105441. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105441

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Alves, I., & Pereira, L. S. (2000). Non-water-stressed baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: A new approach. *Irrigation Science*, *19*(2), 101–106. https://doi.org/10.1007/s002710050007

Calera, A., Campos, I., Osann, A., D'Urso, G., & Menenti, M. (2017). Remote sensing for crop water management: From ET modelling to services for the end users. *Sensors*, *17*(5), 1104. https://doi.org/10.3390/s17051104

Chalmers, D. J., Mitchell, P. D., & van Heek, L. (1981). Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *106*(3), 307–312.

Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). *Yield response to water* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Dry, P. R., Loveys, B. R., & Düring, H. (2000). Partial drying of the rootzone of grape. I. Transient changes in shoot growth and gas exchange. *Vitis*, *39*(1), 3–7.

FAO. (2020). *WaPOR database methodology: Version 2 release, April 2020*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, *58*(2), 147–159. https://doi.org/10.1093/jxb/erl165

Fernández, J. E. (2017). Plant-based methods for irrigation scheduling of woody crops. *Horticulturae*, *3*(2), 35. https://doi.org/10.3390/horticulturae3020035

Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, *96*(9), 1275–1284. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009

Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Jr., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, *24*(1), 45–55. https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7

Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, P. J., Jr. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, *17*(4), 1133–1138. https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133

Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, *55*(407), 2427–2436. https://doi.org/10.1093/jxb/erh213

Kang, S., & Zhang, J. (2004). Controlled alternate partial root-zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, *55*(407), 2437–2446. https://doi.org/10.1093/jxb/erh249

López Hernández, N. A., Rodríguez Moreno, V. M., Ramírez Gottfried, R. I., Trucíos Caciano, R., Inzunza Ibarra, M. A., & Martínez Sifuentes, A. R. (2026). Sentinel-2 and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery for irrigation scheduling in fodder maize: A comparative remote sensing approach. *Plants*, *15*(15), 2265. https://doi.org/10.3390/plants15152265

Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2012). *Crop yield response to water* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, *16*(3), 574–582. https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574