

Caractérisation par capteurs du stress hydrique des cultures selon une approche intégrée sol-plante-microclimat

Conséquences sur la stratégie d'irrigation

H. Mussard_(1, 2*), L. Brialix₍₂₎, Y. Barraud-Roussel₍₂₎ et P. Cannavo_(2*)

1) HortiConseil, 38890 Salagnon, France

2) Institut Agro, EPHOR, 49000 Angers, France

* Auteurs correspondants: hugo1938@hotmail.fr et patrice.cannavo@agrocampus-ouest.fr

RÉSUMÉ

La gestion de l'irrigation est un secteur clé pour la filière agricole. Les méthodes de gestion ne sont plus assez efficaces par rapport aux contraintes climatiques, sociales et économiques et cela se ressent de plus en plus en été. Le marché actuel de la gestion de l'irrigation propose peu de solutions de pilotage par capteurs et ceux-ci ne rendent pas compte du stress hydrique en temps réel ressenti par les cultures. De plus, un seul compartiment (sol, plante ou micro-climat) est souvent instrumenté, ce qui peut être insuffisant pour caractériser le stress hydrique et décider de quand et combien irriguer. Cet article a pour objectif principal de caractériser par différentes méthodes le stress hydrique de la culture du fraisier (*Fragaria x ananassa*). Pour ce faire, la culture des fraisiers a été soumise à 3 régimes d'irrigation (basés sur le pourcentage de remplissage du réservoir utilisable: H100 % (confort hydrique), H50 % (stress modéré), H25 % (stress fort)). Des capteurs sans fil et connectés permettant de suivre l'humidité du sol et le micro-climat ont été installés dans chaque parcelle. Les résultats montrent que les capteurs ont pu détecter les périodes de stress hydrique des fraisiers. Sans affecter la biomasse aérienne et racinaire, le stress hydrique s'est manifesté au niveau des rendements, et des 3 indicateurs suivis durant l'essai: l'humidité volumique du sol, l'évapotranspiration potentielle et le Crop Water Stress Index (CWSI). Une stratégie d'irrigation pluri-composantes basée sur l'agrégation de ces 3 indicateurs permettrait de mieux piloter l'irrigation et de réaliser des économies d'eau substantielles.

Mots-clés

Transpiration, eau, réservoir utilisable, stress hydrique, CWSI, indicateurs, fraisier.

Comment citer cet article:

Mussard H., Brialix L., Barraud-Roussel Y. et Cannavo P., 2024 - Caractérisation par capteurs du stress hydrique des cultures selon une approche intégrée sol-plante-microclimat. *Conséquences sur la stratégie d'irrigation. Étude et Gestion des Sols*, 31, 161-177

SUMMARY**SENSOR-BASED CHARACTERIZATION OF CROP WATER STRESS USING AN INTEGRATED SOIL-PLANT-MICROCLIMATE APPROACH. Consequences for irrigation strategy.**

Irrigation management is a key sector for the agricultural industry. Irrigation management methods are no longer efficient enough to cope with climatic, social and economic constraints, and this is becoming increasingly apparent in summer. The current irrigation management market offers few sensor-based solutions, and these do not reflect the real-time water stress experienced by crops. What's more, only one compartment (soil, plant or micro-climate) is often instrumented, which may be insufficient to characterize water stress and decide when and how much to irrigate. The main aim of this article is to use different methods to characterize water stress in strawberry (*Fragaria x ananassa*). To do this, the strawberry crop was subjected to 3 irrigation regimes (based on the percentage of the accessible soil water reservoir: H100 % (water comfort), H50 % (moderate stress), H25 % (high stress)). Wireless, connected sensors for monitoring soil moisture and micro-climate were installed in each plot. The results show that the sensors were able to detect periods of water stress in the strawberry plants. Without affecting above-ground and root biomass, water stress affected yields and the 3 indicators monitored during the trial: soil volumetric water content, potential evapotranspiration and Crop Water Stress Index (CWSI). A multi-component irrigation strategy based on the aggregation of these 3 indicators would enable better irrigation management and substantial water savings.

Key-words

Transpiration, water, soil water stock, crop water stress, CWSI, indicators, strawberry plants.

RESUMEN**CARACTERIZACIÓN POR SENSORES DEL ESTRÉS HÍDRICO DE LOS CULTIVOS MEDIANTE UN ENFOQUE INTEGRADO SUELO-PLANTA-MICROCLIMA. Consecuencias para la estrategia de riego.**

El manejo del riego es un sector clave para la industria agrícola. Los métodos de manejo ya no son suficientemente eficaces en relación con las limitaciones climáticas, sociales y económicas, y esto se hace cada vez más evidente en el verano. El mercado actual del manejo del riego ofrece pocas soluciones de control basadas en sensores, y éstas no reflejan el estrés hídrico experimentado por los cultivos en tiempo real. Además, a menudo sólo se instrumenta un compartimento (suelo, planta o microclima), lo que puede ser insuficiente para caracterizar el estrés hídrico y decidir cuándo y cuánto regar. El objetivo principal de este artículo es utilizar diferentes métodos para caracterizar el estrés hídrico en cultivos de fresa (*Fragaria x ananassa*). Para ello, el cultivo de fresa se sometió a 3 regímenes de riego (basados en el porcentaje de la reserva útil del suelo: H100 % (confort hídrico), H50 % (estrés moderado), H25 % (estrés alto)). En cada parcela se instalaron sensores inalámbricos conectados para controlar la humedad del suelo y el microclima. Los resultados muestran que los sensores fueron capaces de detectar periodos de estrés hídrico en las plantas de fresa. Sin afectar a la biomasa aérea y radicular, el estrés hídrico afectó a los rendimientos y a los 3 indicadores monitorizados durante el ensayo: contenido en agua volumétrico, evapotranspiración potencial e índice de estrés hídrico de los cultivos (CWSI). Una estrategia de riego multicomponente basada en la agregación de estos 3 indicadores permitiría una mejor gestión del riego y un ahorro sustancial de agua.

Palabras clave

Transpiración, agua, reserva de agua del suelo, indicadores, estrés hídrico del cultivo, CWSI, plantas de fresa.

1. INTRODUCTION

La gestion efficace de l'irrigation est cruciale pour assurer la compétitivité et la résilience de l'industrie agricole en France. Les changements climatiques ont rendu l'accès à l'eau de plus en plus difficile, comme en témoigne la récente mise à jour des normales saisonnières de Météo France pour la période 1991-2020 (Météo-France, 2023). À l'échelle de l'année, les normales actuelles de précipitation ont sensiblement baissé dans le Nord-Est du territoire métropolitain, et particulièrement dans la région Grand Est (-3.63 %). Les autres régions et particulièrement les régions Bretagne, Pays de Loire, PACA et Corse ont vu leurs normales augmenter entre 1,48 et 4 %. Ces augmentations sont à nuancer en fonction des saisons. Le Nord-Est du pays a subi une diminution toutes les saisons, sauf en hiver. Le printemps est la saison où les normales de saison ont le plus diminué, sur presque tout le territoire excepté la région Occitanie. La région PACA a vu sa normale saisonnière bondir en automne, en raison des épisodes pluvieux méditerranéens plus fréquents et violents à cette période. Les méthodes actuelles de gestion de l'irrigation sont devenues inefficaces face aux contraintes climatiques, sociales et économiques, ce qui se traduit par des difficultés croissantes chaque été. L'année 2022 a été particulièrement difficile, et l'année 2023 a commencé par une sécheresse hivernale historique de 32 jours sans pluie en février-mars, ainsi qu'un retard de remplissage des nappes phréatiques de deux mois, selon le Ministère de la Transition Écologique¹. Certaines préfectures du sud de la France ont pris des mesures de restriction d'eau dès le début du printemps. Malheureusement, ces situations se reproduiront à l'avenir.

D'un point de vue économique, les producteurs - et particulièrement les horticulteurs - cherchent à améliorer leur compétitivité. Parmi les leviers possibles, la gestion de la ressource en eau représente un enjeu environnemental majeur. Plusieurs labels environnementaux tels que Plante Bleue ou Haute Valeur Environnementale (HVE) existent en ce sens afin de témoigner de leurs bonnes pratiques en matière de préservation de la ressource en eau. Pour obtenir ces labels, les candidats doivent être les plus efficaces possibles dans la gestion de l'eau, en utilisant des outils de mesure tels que des capteurs ou des stations météorologiques pour une irrigation plus précise et efficace. Enfin, les pouvoirs publics ont récemment mis en place un plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau incluant, parmi 53 mesures, une réduction de notre consommation en eau de 10 % (Gouvernement français, 2023). Dans ce contexte, l'irrigation de précision est un levier majeur à explorer pour atteindre cet objectif.

La caractérisation des flux d'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère revêt une importance capitale. L'autonomie hydrique des plantes est fortement dépendante du réservoir d'eau du sol disponible et accessible pour les plantes, ce réservoir dépendant principalement de la texture et de l'épaisseur du sol. De plus, les besoins en eau des plantes sont dépendants de deux variables climatiques, les précipitations et l'évapotranspiration. Les conditions microclimatiques qui entourent la plante ont donc une influence majeure. En cas de stress hydrique, la plante met en place différentes stratégies pour assurer sa survie et maintenir un état hydrique adapté à son environnement (Despinasse, 2015 ; Wittling et Ruelle, 2022). Des signaux chimiques et hydrauliques sont transmis à la feuille de la plante par les voies du xylème (Limpus, 2009), ce qui entraîne des réponses physiologiques telles que la fermeture des stomates et des réductions du taux de photosynthèse. Wang *et al.* (2015) ont également montré que les cultures soumises à un stress hydrique présentent une évapotranspiration réduite ainsi que d'autres symptômes tels que le flétrissement des feuilles, un retard de croissance et une réduction de la surface foliaire. Ces réponses physiologiques sont influencées par plusieurs facteurs externes tels que la température et l'humidité de l'air, ainsi que la texture du sol et l'humidité volumique du sol (Wittling et Ruelle, 2022). Dans leur étude, Ihuoma et Madramootoo (2017) ont dressé une liste des avantages et des inconvénients des différentes méthodes et indicateurs de surveillance du stress hydrique des plantes. Ces outils sont souvent mono-composants, c'est-à-dire qu'ils se concentrent sur le sol, la plante ou le microclimat. Une approche intégrée du système sol-plante-microclimat est donc une piste intéressante à explorer (Mussard et Cannavo, 2023). En effet, les progrès en métrologie permettent aujourd'hui de suivre en continu les différentes composantes du bilan hydrique, notamment grâce à des capteurs permettant le pilotage de l'irrigation. Cependant, le marché actuel de la gestion de l'irrigation propose encore peu de solutions de gestion pilotée par capteurs qui rendent compte du stress hydrique ressenti en temps réel par les cultures. Il est donc nécessaire de poursuivre les recherches dans ce domaine afin de développer des outils plus performants pour surveiller et gérer efficacement le stress hydrique des plantes.

L'objectif principal de cet article est de caractériser par différentes méthodes le stress hydrique de la culture du fraisier (*Fragaria x ananassa*). Cette espèce a été choisie car elle a une forte sensibilité au stress hydrique (Klamkowski et Treder, 2006 ; Yenni *et al.*, 2022). De plus, il s'agit d'une espèce basse ayant un fort recouvrement (en seulement quelques mois), simple à caractériser. Trois indicateurs, la teneur en eau volumique du sol, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et le Crop Water Stress Index (CWSI) ont été mesurés. La teneur en eau volumique du sol et la réserve d'eau qui en découle correspondent à la quantité d'eau présente dans une épaisseur de sol donnée. Cette réserve est comparée aux deux composantes du réservoir

¹ https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/02/22/secheresse-hivernale-sans-veritable-pluie-depuis-32-jours-la-france-est-en-etat-d-alerte-selon-christophe-bechu-ministre-de-la-transition-ecologique_6162826_3244.html

utile maximal (RUM) qui représente une quantité maximale d'eau du sol stockable et utilisable par la plante : le réservoir facilement utilisable (RFU) et le réservoir difficilement utilisable (RDU). L'évapotranspiration potentielle correspond à la quantité d'eau qui serait évaporée et transpirée par une culture saine et bien alimentée, couvrant complètement le sol et ayant suffisamment d'eau à disposition. Le CWSI est basé sur la différence de température entre la canopée et l'air ainsi que sur la valeur du déficit de pression de vapeur de l'air. Plus la différence de température est importante et plus le déficit de pression de vapeur de l'air est élevé, plus le CWSI est élevé, indiquant une sécheresse accrue de la canopée (Ekinzog et al., 2022). Cet indicateur est utilisé dans le secteur horticole, en arboriculture (Gonzalez-Dugo et al., 2014 ; Blaya-Ros et al., 2020 ; Sanchez-Pinero et al., 2022), en maraichage (Colak et al., 2015 ; Ekinzog et al., 2020), et en production hors-sol (Adeyemi et al., 2018). Ces 3 indicateurs ont été choisis car (1) chacun caractérise une composante du continuum sol (teneur en eau volumique) - plante (CWSI) - climat (ETP), (2) ce sont les indicateurs les plus utilisés

par les producteurs. Sur la base de ce travail expérimental, un outil d'aide à la décision intégrant le comportement hydrique du système intégré sol-plante-atmosphère est proposé. Il se fonde sur des règles de décision qui devraient permettre de réaliser des économies d'apport d'eau par irrigation, en comparaison des méthodes traditionnelles. Les hypothèses de ce travail sont que (1) les capteurs sont capables de détecter les signes de stress hydrique de *Fragaria x ananassa*, et (2) l'approche multi-composantes est nécessaire pour améliorer l'aide à la décision.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Zone d'étude et plan d'expérimentation

L'essai expérimental s'est déroulé en plein champ au sein de la plateforme PHENOTIC à l'Institut Agro à Angers (49). Le climat est océanique (classification Köppen-Geiger) avec des hivers relativement frais et humides et des étés chauds. La

Tableau 1 : Principales propriétés physico-chimiques du sol de l'étude. Signification des lettres des horizons de sol : L - horizon organo-minéral labouré, A - horizon organo-minéral, Eg - horizon éluvial avec traces d'hydromorphie, BTg - horizon illuvial d'accumulation d'argile avec traces d'hydromorphie, Cg - horizon d'altération de la roche mère avec traces d'hydromorphie.

Table 1: Main physico-chemical properties of the studied soil. Meaning of soil layer letters: L - ploughed organo-mineral layer, A - organo-mineral layer, Eg - eluvial layer with traces of hydromorphy, BTg - illuvial layer of clay accumulation with traces of hydromorphy, Cg - layer of bedrock alteration with traces of hydromorphy.

Horizon	L (0-20 cm)	A (20-40 cm)	Eg (40-50 cm)	BTg (50-90 cm)	Cg (90-120 cm)
Texture					
Argile (% de terre fine)	6	6,9	22	36,5	31,3
Limon (% de terre fine)	21,9	19,6	39,6	31,7	28,3
Sable (% de terre fine)	70,4	72,1	37,8	31,1	39,7
Elements grossiers (%)	15,3				
Propriétés chimiques					
pH _{H₂O}	6,4	6,7	7,2	7,5	5,1
pHKCl	5,6	5,8	6,3	6,6	3,8
Matières organiques du sol (g.kg ⁻¹)	16	13	6	< 6	<6
Total C (g.kg ⁻¹)	9,5	7,7	3,5	<3	<3
Total N (g.kg ⁻¹)	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
C:N ratio	12,7	13,7	7,4	<7,4	<10,8
P ₂ O ₅ (mg.kg ⁻¹)	89	104	16	10	<10
K ₂ O (mg.kg ⁻¹)	106	61	140	111	71
MgO (mg.kg ⁻¹)	73	61	157	168	125
Na ₂ O (mg.kg ⁻¹)	12	11	12	27	21
CaO (mg.kg ⁻¹)	975	936	1 324	2 528	1 149
CaCO ₃ (g.kg ⁻¹)	<1	<1	<1	<1	<1
CEC (meq.100 g ⁻¹)	3,8	3,8	6,3	7,7	7,2

température et les précipitations moyennes annuelles sont de 11,5 °C et 690 mm, respectivement (Météo France, 1991-2020).

Le sol de l'étude est un Luvisol redoxisol (Référentiel Pédologique; AFES, 2008). Ce sol présente un horizon BTg quasi imperméable à 50 cm de profondeur environ. Ce sol est drainé et a fait l'objet d'un sablage sur 40 cm d'épaisseur durant les précédentes décennies pour un objectif de production maraichère. Des échantillons composites (regroupement de 5 réplicats) ont été constitués dans les horizons 0-20 cm et 20-40 cm. Les analyses sont présentées dans le *tableau 1*. Les caractéristiques des horizons inférieurs sont issues de Ramananjatovo *et al.* (2021) dont les travaux ont été réalisés dans une parcelle adjacente.

2.2 Caractéristiques du sol

Les composantes caractéristiques du réservoir en eau du sol ont été calculées de la manière suivante. Tout d'abord, le réservoir utile maximal (RUM) représente la part d'eau du sol disponible pour les plantes. Il est calculé ainsi :

$$(1) \text{RUM} = (\text{Hcc} - \text{Hpfp}) \times \text{Da} \times e \times F$$

Avec RUM réservoir utile maximal (mm), Hcc humidité massique à la capacité au champ (%), Hpfp humidité massique au point de flétrissement permanent (%), Da la masse volumique du sol (g.cm^{-3}), e l'épaisseur du sol (dm).

Le RUM est la somme de deux composantes, le réservoir facilement utilisable (RFU, mm) et le réservoir difficilement utilisable (RDU, mm) :

$$(2) \text{RFU} = (\text{Hcc} - \text{Hpft}) \times \text{Da} \times e$$

Avec Hpft humidité massique au point flétrissement temporaire (%)

$$(3) \text{RDU} = \text{RUM} - \text{RFU}$$

Les déterminations ont été réalisées de la façon suivante :

Masse volumique apparente du sol (Da) :

des échantillons de sol non remaniés ont été prélevés dans des cylindres de diamètre 10 cm et de hauteur 5 cm (Méthode Eijkelpamp, ISO 11272). Une répétition par placette dans l'horizon 5-15 cm a été effectuée (n = 9), en début d'expérimentation et avant plantation des fraisiers. Les échantillons ont été séchés à l'étuve pendant 48 h et à 105 °C.

Tableau 2 : Propriétés hydriques de l'horizon 0-20 cm du sol. Hcc humidité massique à la capacité au champ, Hpfp humidité massique au point de flétrissement permanent, Da la masse volumique du sol, RUM réservoir utile maximal, RFU réservoir facilement utilisable, RDU réservoir difficilement utilisable.

Table 2: Soil water properties of the 0-20 cm soil layer. Hcc gravimetric moisture at field capacity, Hpfp gravimetric moisture at permanent wilting point, Da soil bulk density, RUM maximum usable reservoir, RFU easily usable reservoir, RDU reservoir difficult to use.

Da (g cm^{-3})	Hcc (% gravimétrique)	Hpft (% gravimétrique)	Hpfp (% gravimétrique)	RUM (mm)	RFU (mm)	RDU (mm)
1,46	9,5	6,0	4,9	17,9	13,7	4,1

Humidités caractéristiques du sol :

les humidités volumiques à la capacité au champ (Hcc), au point de flétrissement temporaire (Hpft) et au point de flétrissement permanent (Hpfp), ont été déterminées à l'aide de presses de Richards, aux potentiels matriciels de -33, -1 000 et -1 500 kPa, respectivement (Richards 1947; Williams 1964; Morel 1996). Pour ce faire, 3 échantillons de sol non remaniés ont été prélevés entre 5 et 15 cm de profondeur, avant la plantation des fraisiers, dans des cylindres de diamètre 10 cm et de hauteur 5 cm.

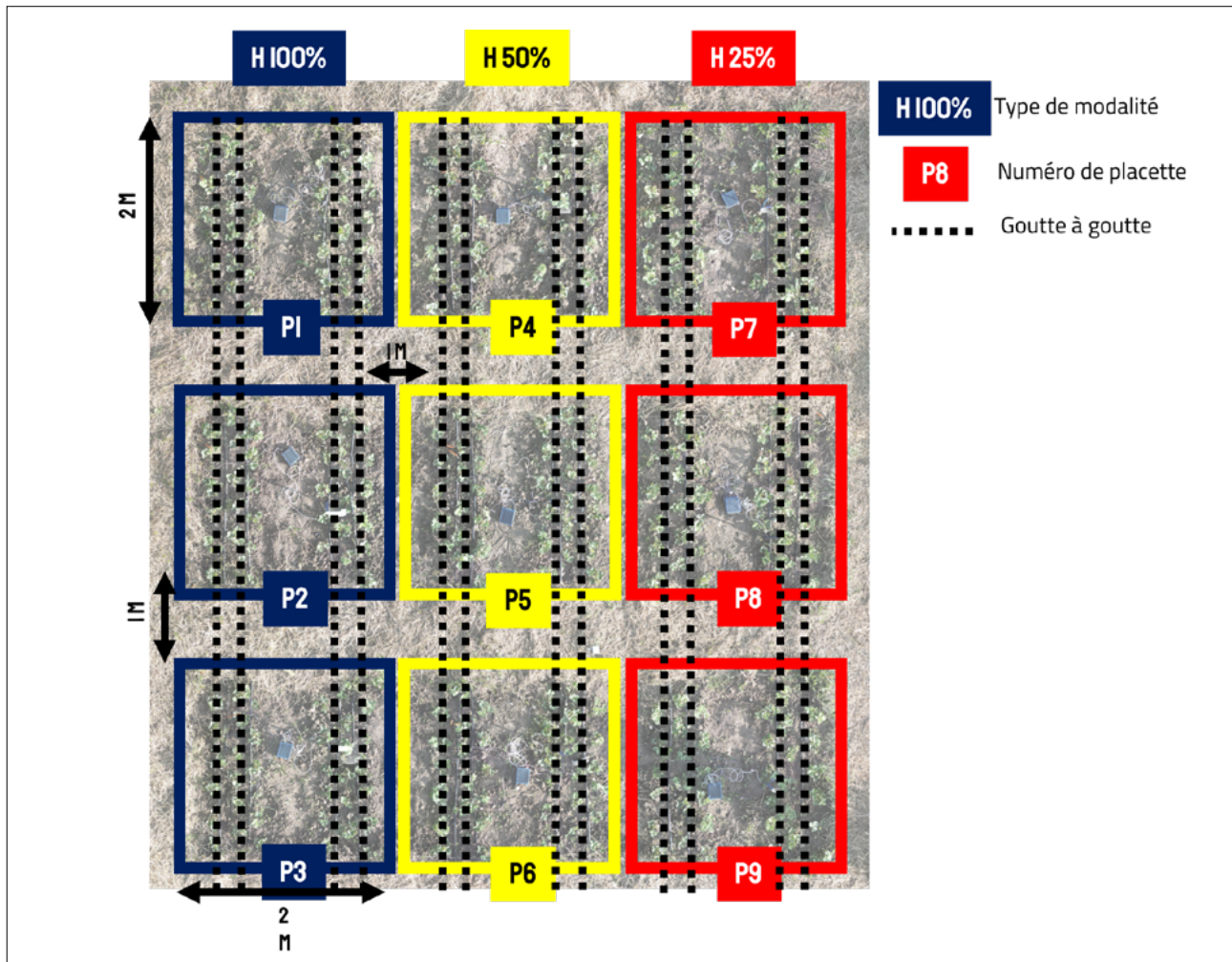
La texture et la densité des sols ont un impact direct sur les valeurs de réservoir en eau du sol (Bruand *et al.*, 2004; Bouthier *et al.*, 2022). Le RUM du premier horizon (0-20 cm) du sol était de 17,9 mm (*Tableau 2*), ce qui est conforme à une texture à dominante sableuse. En effet, Bruand *et al.* (2004) donnent des valeurs de RUM allant de 12 à 26,6 mm pour des textures sableuses et sablo-limoneuses, respectivement. Ainsi, cela se traduit par une valeur de RUM relativement basse, preuve d'une faible autonomie hydrique pour des cultures s'enracinant sur une dizaine de centimètres de profondeur comme le fraisier. Le RFU du sol s'élève à 13,7 mm, valeur de référence qui a permis de calculer les temps d'arrosage pour chaque modalité d'irrigation.

2.3 Plan expérimental

Trois régimes d'irrigation ont été mis en œuvre et se basent sur le pourcentage de remplissage de la RFU: H100 % (confort hydrique), H50 % (stress modéré), H25 % (stress fort). La *figure 1* schématise le dispositif expérimental. Pour chaque régime d'irrigation, 3 placettes (répliquats) ont été mises en place. Ces placettes de 2 m de côté chacune ont été plantées en fraisiers (variété Charlotte), avec une densité de plantation de 8 plants.m⁻². Concrètement cela se traduit par des placettes de 6 rangs de fraisiers, avec 6 fraisiers par ligne et plantés en quinconce. Un système d'irrigation par goutte-à-goutte a été installé, entre les rangs de fraisiers, avec un débit de 7 L.h⁻¹.m⁻². La variété Charlotte a été utilisée, car celle-ci a un fort développement foliaire, peu sensible aux maladies et est dotée d'une grande sensibilité au stress hydrique. Les jeunes plants étaient en racines nues de calibre A (10 à 15 mm au niveau du collet) ayant été forcé pendant 5 mois à une température proche de -2 °C.

Figure 1 : Plan de la parcelle expérimentale structurée en 9 placettes. H100 % H50 % H25 % correspondent à des apports d'eau de 100, 50, 25 % du RFU, respectivement. Trois réplicats par régime d'irrigation.

Figure 1: Plan of the experimental plot structured into 9 sub-plots. H100 % H50 % H25 % correspond to water inputs of 100, 50, and 25 % of the easily extractible soil water, respectively. Three replicates per irrigation regime.



2.4 Stratégie d'irrigation

Les fraisiers ont été plantés le 5 avril 2023, et ont reçu un fertilisant organique (14,5 cm³ par plants de DCM Mix 2 (7-6-12)) les 25 avril et 20 juin 2023. Il n'y a pas eu de traitement contre les maladies et les parasites. Un désherbage régulier (toutes les 1 à 2 semaines) a été réalisé à la main.

La décision d'irriguer a reposé sur le suivi des sondes capacitatives. Dès lors que l'humidité du sol atteint l'humidité au point de flétrissement temporaire (déterminée à la succion de -1000 kPa), la décision d'irriguer est déclenchée. La quantité d'eau à apporter correspond à la quantité d'eau que peut recevoir le RFU et dont la valeur maximale correspond à l'humidité à la capacité au champ (succion de -33 kPa). En connaissant le débit des goutteurs (7 mm.h⁻¹) et la valeur du RFU du sol

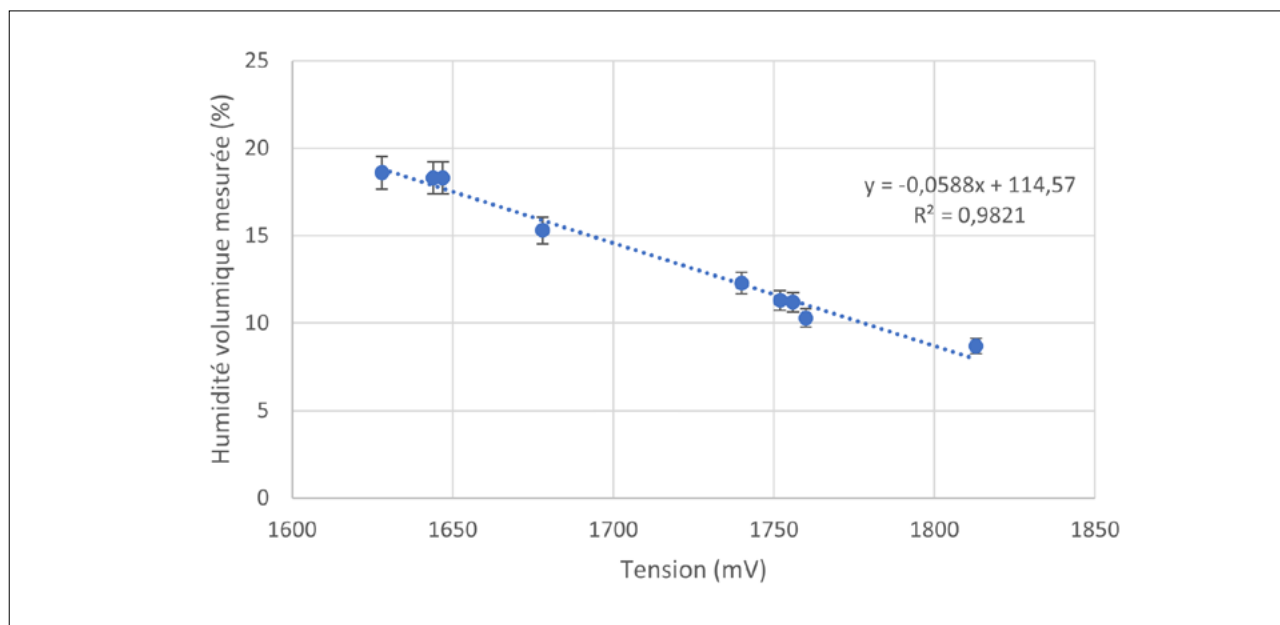
(13,7 mm), le temps d'irrigation était d'environ 2 heures. Ce temps de référence correspond à la situation de confort hydrique H100 %. Pour les modalités H50 et H25 %, le temps d'irrigation a été divisé par 2 (irrigation de 6,9 mm) et par 4 (irrigation de 3,4 mm), respectivement.

2.5. Mesures réalisées

L'expérimentation s'est déroulée du 5 avril au 30 juillet 2023. Les différentes mesures réalisées sont présentées ci-après.

2.5.1 Mesures dans le compartiment sol

Les différentes mesures dans le sol se sont limitées aux 10 premiers centimètres de sol, selon Bosc et Bardet (2014), qui

Figure 2 : Courbe d'étalonnage de sondes capacitives. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standard (n=3).**Figure 2:** Calibration curve for capacitive probes. Error bars correspond to standard errors (n=3).

signalent un enracinement généralement observé du fraisier jusqu'à 10 cm de profondeur

Suivi de l'humidité du sol: des capteurs de type capacitifs ont été utilisés pour suivre l'humidité volumique du sol. Il s'agit de sondes AquaCapa (Horticonseil, France, plage de mesure 0 à 0,7 m³m⁻³, précision ± 0,04 m³m⁻³), installées verticalement dans l'horizon 0-10 cm (1 par placette, n = 9). Ces capteurs sont sans fil (réseau Lora) et autoalimentés par panneaux solaires; l'acquisition se fait toutes les 15 minutes. Le récepteur de données a été développé par HortiConseil et le stockage est sous csv sous carte SD (32 Go).

Des prélèvements de sol à la tarière ont été réalisés à 9 dates dans l'horizon 0-10 cm durant l'essai afin de déterminer l'humidité gravimétrique, à raison de 3 prélèvements par placette à proximité des sondes (n = 27). Ces humidités ont été transformées en humidité volumique en les multipliant par la masse volumique apparente Da. Ces mesures ont permis de contrôler les mesures relevées par les capteurs. Les sols prélevés étaient séchés à l'étuve durant 48 h et à 105 °C.

La *figure 2* présente l'équation d'étalonnage des sondes capacitives. La performance des capteurs au regard des critères statistiques est très bonne (R² = 0,98, RMSE = 0,64 %). La courbe d'étalonnage couvre bien la plage d'humidité des sols allant de l'humidité au point de flétrissement permanent à l'humidité à la capacité au champ. Cette équation a été utilisée dans le cadre de cette étude.

2.5.2 Mesures dans le compartiment plante

Recouvrement foliaire :

Le recouvrement du fraisier a été choisi comme paramètre d'évaluation de la cinétique de croissance de la biomasse aérienne afin (1) d'éviter la destruction des plants, et (2) de développer une méthode innovante de mesure de cette croissance, grâce à l'imagerie par drone puis traitement sur Qgis. Une fois par semaine après plantation des fraisiers, une orthophotographie par drone (DJI mini 3 pro, Chine) a été réalisée. Le logiciel Qgis a été utilisé pour quantifier la surface occupée par les fraisiers. La *figure 3* illustre l'utilisation de l'imagerie pour estimer la surface de recouvrement des fraisiers.

Rendement des fraisiers :

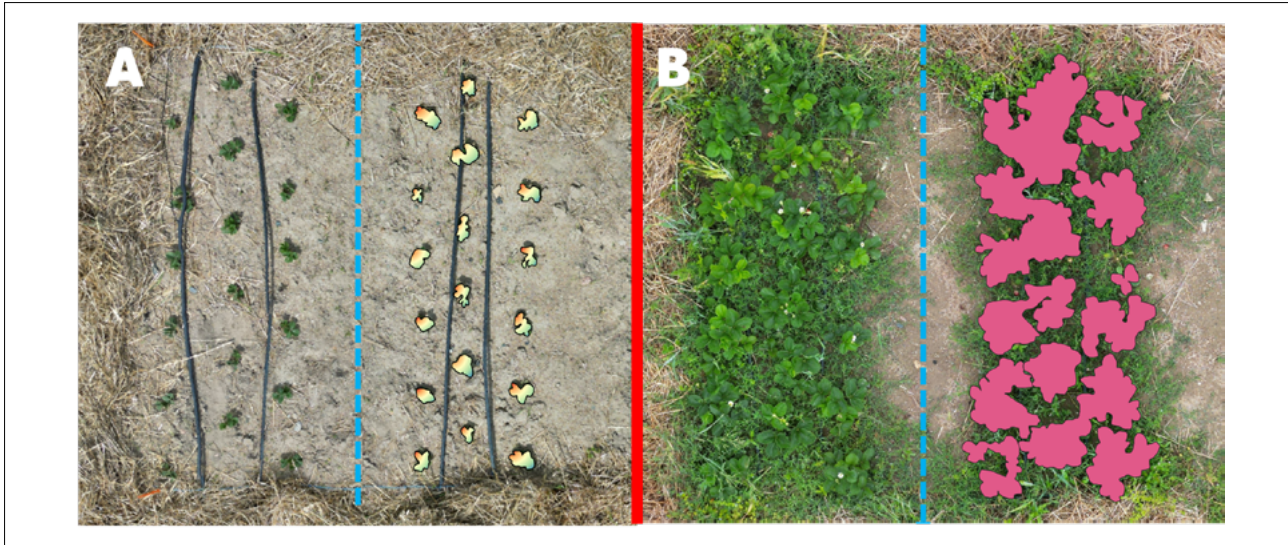
Deux fois par semaine, les fraises ont été récoltées dans chaque placette puis comptées et pesées. Dans cette étude sont présentés les rendements cumulés sur l'ensemble de l'expérimentation.

Biomasse aérienne et racinaire :

À la fin de l'essai début août 2023, 3 plants par placette (n = 9) ont été prélevés à la pelle sur 15 cm de profondeur. La partie racinaire a été délicatement lavée à l'eau. Les biomasses aérienne et racinaire sèches ont ensuite été déterminées par pesée après séchage à l'étuve à 65 °C jusqu'à poids constant.

Figure 3 : recouvrement des fraisiers dans une placette, le 21 avril 2023 (A) et le 16 juin 2023 (B). Les formes colorées représentent les fraisiers.

Figure 3: Strawberry cover in a plot on 21 April 2023 (A) and 16 June 2023 (B). The coloured shapes represent strawberry plants.



2.5.3 Mesures dans le compartiment aérien

Données météorologiques :

L'évapotranspiration potentielle (ETP) et la pluviométrie journalière sont issues de la station Météo-France de Beaucouzé (49) située à moins de 500 m du site expérimental. L'ETP a été calculée selon le modèle de Penman-Monteith (Penman, 1973).

$$(4) \text{ETP} = \frac{\Delta R_n + 2 \rho_{\text{air}} \text{LAI} C_{pa} \text{DPV}/R_a}{\Delta + 2 \gamma \left(1 + \frac{R_c}{R_a}\right)}$$

Avec R_n rayonnement net absorbé par la plante (W m^{-2}), ρ_{air} la densité de l'air (kg m^{-3}), C_{pa} la chaleur spécifique de l'air ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), γ constante psychrométrique, R_a et R_c résistances aérodynamique et stomatique (s m^{-1}), respectivement, LAI indice de surface foliaire ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), DPV déficit de vapeur de l'air (Pa), et Δ est la pente de la courbe de la pression de vapeur d'eau saturée en fonction de la température.

Mesures micro-climatiques :

Les sondes AquaCapa (HortiConseil) ont été conçues pour déterminer la température de l'air et humidité de l'air (thermistance, plage de mesure -40 à 125 °C, précision $\pm 0,2$ °C pour la température ; et plage 0-100 %, précision $\pm 1,8$ % pour l'humidité de l'air), la luminosité (photorésistance, 0 à 120 klx, précision ± 1 %), la hauteur du végétal (LIDAR, 0 à 400 cm, $\pm 0,15$ cm) et la température du végétal (-20 à 100 °C, $\pm 0,5$ °C). Une sonde a été installée dans chaque placette ($n = 9$). Tous ces capteurs ont eu une calibration d'usine. L'acquisition se fait toutes les 15 minutes, les capteurs sont sans fils (réseau Lora) et autoalimentés par panneaux solaires. Le récepteur de données

est développé par HortiConseil et le stockage est sous csv sous carte SD (32 Go).

2.6 Traitement des données et analyses statistiques

2.6.1 Traitement des images par drone et par calcul du recouvrement foliaire

Les ortho-photographies ont été prises par drone à 2 m au-dessus du sol afin d'avoir l'ensemble d'une placette (4 m^2) avec une résolution de $4\,032 \times 3\,024$ pixels. Avec le logiciel Qgis, les contours des fraisiers ont été délimités manuellement, puis traduits en surface. Le taux de recouvrement a été calculé comme étant la surface occupée par les fraisiers, ramenée à la surface de la placette. La vitesse du taux de recouvrement correspond à la variation du taux de recouvrement divisée par le nombre de jours entre 2 mesures consécutives.

2.6.2 Calcul du CWSI

Le Crop Water Stress Index se calcule à partir de la formule suivante :

$$(5) \text{CWSI} = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LI}}{(T_c - T_a)_{LS} - (T_c - T_a)_{LI}}$$

Avec T_c température de la canopée, T_a température de l'air, $(T_c - T_a)_{LI}$ la limite inférieure représentant la situation de confort hydrique et $(T_c - T_a)_{LS}$ la limite supérieure en condition d'arrêt de la transpiration de la plante (stress hydrique maximal).

Lorsque la plante est en confort hydrique, la valeur du CWSI sera proche de 0, alors que lorsque la plante est en condition de stress sévère, la valeur du CWSI sera proche de 1. Les limites supérieures et inférieures du CWSI sont spécifiques aux espèces végétales cultivées.

Il existe plusieurs approches de calcul de ces limites, parmi lesquelles les approches empiriques, théoriques ou hybrides (combinaison des 2 approches précédentes). L'approche empirique est celle nécessitant le moins de paramètres bioclimatiques et qui sont de plus facilement accessibles. C'est cette approche qui a été développée ici. L'approche empirique établit une relation entre la température de l'air (T_a), la température de la canopée (T_c) et le déficit de pression de vapeur (DPV), à partir duquel la limite inférieure, connue sous le nom de « ligne de base sans stress hydrique » - est dérivée. Ainsi, le principal avantage de cette approche est qu'elle ne nécessite que la mesure des trois variables mentionnées précédemment. Néanmoins, la limite inférieure est très sensible aux changements des variables climatiques, telles que le rayonnement et la vitesse du vent (Kanjo Ekinzog *et al.*, 2022).

Les équations (6) et (7) expriment les limites inférieure (LI) et supérieure (LS) du CWSI, respectivement :

$$(6) (T_c - T_a)_{LI} = \alpha \times DPV + \beta$$

Avec α et β des coefficients déterminés par régression linéaire, DPV en hPa

$$(7) (T_c - T_a)_{LS} = \gamma \times GPV + \delta$$

Avec γ et δ des coefficients déterminés par régression linéaire, et GPV le gradient de pression de vapeur défini comme la différence entre la pression de vapeur saturante évaluée à la température de l'air T_a , et à une température de l'air plus élevée que la température de l'air d'une valeur "f", notée T_{a+f} :

$$(8) GPV = 6.1 \times e^{\left(\frac{17.27 \times T_{a+f}}{(T_{a+f}) + 237.3}\right)} - 6.1 \times e^{\left(\frac{17.27 \times T_a}{T_a + 237.3}\right)}$$

La figure 4 illustre le principe de cet indicateur.

2.6.3 Analyses statistiques

Le logiciel R a été utilisé pour les traitements statistiques suivants : analyse ANOVA à 1 facteur (régime d'irrigation) sur le recouvrement foliaire, la biomasse aérienne et racinaire, le rendement de fraises (Lê *et al.*, 2008). La performance de mesure des sondes capacitatives a été évaluée en calculant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation, comparativement aux humidités volumiques du sol par prélèvement de sol à la tarière.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Impact du stress hydrique sur la croissance et le rendement des fraisiers

Le tableau 3 présente les résultats de l'analyse ANOVA concernant l'impact du régime d'irrigation sur le développement des fraisiers en fin d'expérimentation. L'analyse montre que le régime d'irrigation a eu un impact sur la vitesse de recouvrement et le rendement des fraisiers. En revanche, il n'y a pas eu d'effet significatif sur les biomasses aériennes et racinaires

Le tableau 4 et la figure 5 présentent l'évolution des vitesses de recouvrement du fraisier. La plage de mesures couvre la période du 28 avril au 30 juin 2023. Avant le 26 mai, les fraisiers n'ont pas encore été irrigués. L'ANOVA ne montre donc pas de différences entre les modalités d'irrigation. À partir du 26 mai, le régime d'irrigation différencié est mis en place. Des différences significatives apparaissent alors entre les régimes d'irrigation, avec une vitesse qui décroît lorsque l'on apporte de moins en moins d'eau. Seulement 3 semaines de restriction en eau ont suffi pour marquer

Figure 4 : Illustration schématique du CWSI empirique (Mussard et Cannavo, 2023). La flèche rouge montre l'évolution de la différence de température canopée-air ($T_c - T_a$) d'une culture stressée sur une journée. Les flèches vertes montrent l'évolution de la $T_c - T_a$ d'une culture bien irriguée sur une journée. La ligne bleue représente la ligne de base sans stress hydrique.

Figure 4: Schematic illustration of the empirical CWSI (Mussard and Cannavo, 2023). The red arrow shows the evolution of the canopy-air temperature difference ($T_c - T_a$) of a stressed crop over one day. The green arrows show the change in $T_c - T_a$ for a well-irrigated crop over one day. The blue line represents the baseline without water stress.

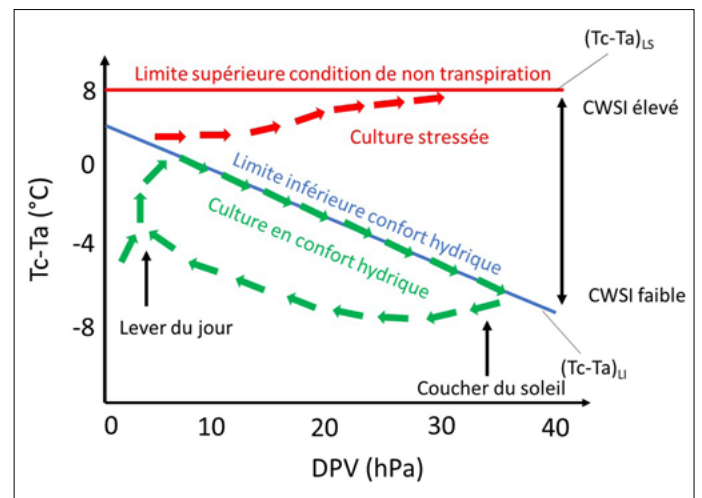


Tableau 3 : Effet du régime d'irrigation sur la vitesse de recouvrement, la biomasse aérienne et racinaire du fraisier et sur le rendement de fraises. F correspond au résultat du test de Fisher, p est la probabilité critique.

Table 3: Effect of irrigation regime on plant cover rate, above-ground and root biomass of strawberry plants and on strawberry yield. F is the Fisher test result, p is the critical probability.

Facteur	Vitesse de recouvrement		Biomasse aérienne		Biomasse racinaire		Rendement de fraises	
	F	p	F	p	F	p	F	p
Régime d'irrigation	5,59	0,04*	1,71	0,26	3,44	0,10	323,47	0,00***

* $p < 0,05$, *** $p < 0,001$

Tableau 4 : Évolution de la vitesse de recouvrement du fraisier pour chaque modalité d'irrigation (en % par jour). M100, M50 et M25 représentent les modalités d'irrigation, 100 %, 50 % et 25 % de la RFU. Les valeurs sont les moyennes de 3 répétitions. Les lettres a, b, c correspondent aux groupes significativement différents entre les modalités d'irrigation.

Table 4: Evolution of strawberry cover rate for each irrigation modality (in % per day). Values are averages of 3 replicates. M100, M50 and M25 represent the irrigation treatments, 100 %, 50 % and 25 % of the easily accessible water reserve. Letters a, b, c correspond to significantly different groups between irrigation modalities.

		28/04/2023	*	12/05/2023	*	19/05/2023	*	26/05/2023	*	05/06/2023	*	16/06/2023	*	30/06/2023	*
Vitesse de recouvrement (% recouvrement/ jour)	M100	0,58	a	0,84	a	0,52	a	0,39	a	0,30	a	0,93	a	0,60	a
	M50	0,54	a	0,71	a	0,64	a	0,18	a	0,12	a	0,48	b	0,61	a
	M25	0,55	a	0,77	a	0,58	a	0,10	a	0,07	a	0,41	c	0,66	a
	Moy.	0,56		0,77		0,58		0,22		0,16		0,61		0,62	

Figure 5 : Évolution de la vitesse de recouvrement du fraisier pour chaque modalité d'irrigation (en % par jour). M100, M50 et M25 représentent les modalités d'irrigation, 100 %, 50 % et 25 % du RFU. Les barres verticales représentent les erreurs standard (n=3). La zone rouge sur le graphique correspond à la période de mise en place de l'irrigation.

Figure 5: Evolution of strawberry recovery rate for each irrigation modality (in % per day). Values are averages of 3 replicates. M100, M50 and M25 represent the irrigation treatments, 100 %, 50 % and 25 % of the easily accessible water reserve. Bars represent standard errors (n=3). The red zone on the graph corresponds to the period when irrigation was necessary.

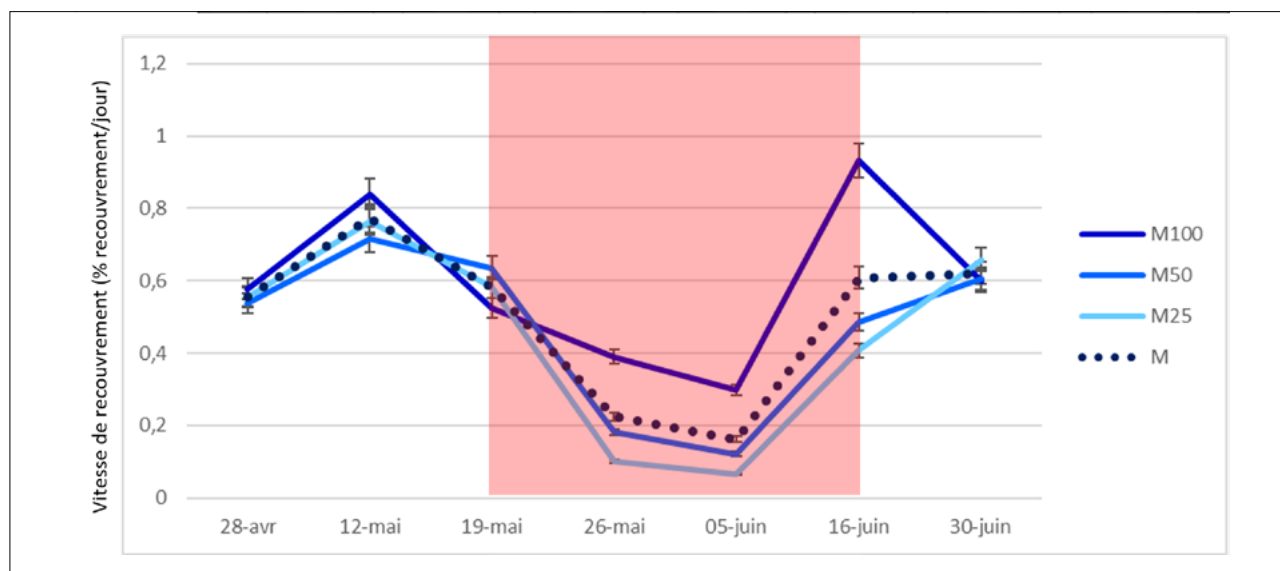


Tableau 5 : Biomasse aérienne et racinaire des fraisiers (en g sec.plant⁻¹), et rendement des fraisiers (en g.m⁻²), en fonction de la modalité d'irrigation (100, 50 et 25 % de la RFU). Les lettres a, b, c correspondent aux groupes significativement différents entre les modalités d'irrigation (ANOVA, facteur régime d'irrigation, n=3).

Table 5: Aerial and root biomass of strawberry plants (g dw. Plant⁻¹), and strawberry yield (in g.m⁻²), as a function of irrigation regime (100, 50 and 25 % of the easily accessible water reservoir). Letters a, b, c correspond to significantly different groups between irrigation modalities (ANOVA, irrigation treatment factor, n=3).

Modalité d'irrigation	Biomasse aérienne (g sec .plant ⁻¹)	Biomasse racinaire (g sec .plant ⁻¹)	Rendement de fraises (g.m ⁻²)
M100	47,9 a	25,6 a	704,5 a
M50	42,4 a	21,5 a	366,7 b
M25	52,4 a	28,7 a	326 b

significativement la croissance des fraisiers. À partir du 9 juin, des précipitations orageuses se sont produites, l'irrigation n'était plus nécessaire. On constate alors qu'au 30 juin, les vitesses de recouvrement sont identiques, quel que soit le régime d'irrigation. Au 30 juin, les taux de recouvrement étaient de 91, 75, 79 % à H100 %, H50 % et H25 %, respectivement. Cette courte et unique période de besoin d'irrigation durant la saison 2023 a donc permis d'identifier des réactions physiologiques et morphologiques du fraisier face au stress hydrique. On peut s'interroger sur la capacité du fraisier en stress hydrique à reprendre une vitesse de recouvrement comparable à une modalité de confort hydrique si la période de sécheresse avait été plus longue.

À la fin de l'expérimentation, la biomasse racinaire et la biomasse aérienne des fraisiers (sans les fruits) ont été mesurées. Nous n'avons pas observé de différences entre les modalités (Tableau 5). Cela signifie que la période de gestion différenciée de l'irrigation n'a pas été suffisamment longue pour induire des désordres physiologiques allant jusqu'à une réduction significative de la biomasse, et ce malgré une baisse de la vitesse de recouvrement. Néanmoins des signes visuels de stress hydrique (flétrissement des feuilles) ont été régulièrement observés. La réponse physiologique du stress chez le fraisier a été observée par Yenni *et al.* (2022), où la même espèce de fraisier a été soumise à une restriction hydrique (75, 50, 25 % de la RFU) pendant 5 mois en culture hors-sol. Pour ces auteurs, cela s'est traduit par une baisse de 24, 8, et 17 % de la hauteur, du nombre de feuilles et du diamètre de la couronne, respectivement, entre le confort et 50 % d'irrigation. Klankowski et Treder (2006) n'ont pas observé de différences au niveau de la longueur des racines. Dans le cas de notre étude, le stress hydrique a eu cependant un impact sur le rendement de fraises sur la période du 30 mai au 30 juillet 2023 (Tableau 5). En confort hydrique (H100) la production de fraisiers était significativement supérieure (704,5 g.m⁻²), aux modalités H50 (366,7 g.m⁻²) et H25 (326 g.m⁻²). Il n'y a pas eu de différence significative entre les modalités H50 et H25. Cette diminution de 48 % entre les modalités H100 et

H50 est beaucoup plus importante que les -27 % observés par Yenni *et al.* (2022).

3.2 Indicateurs du suivi du stress hydrique des cultures

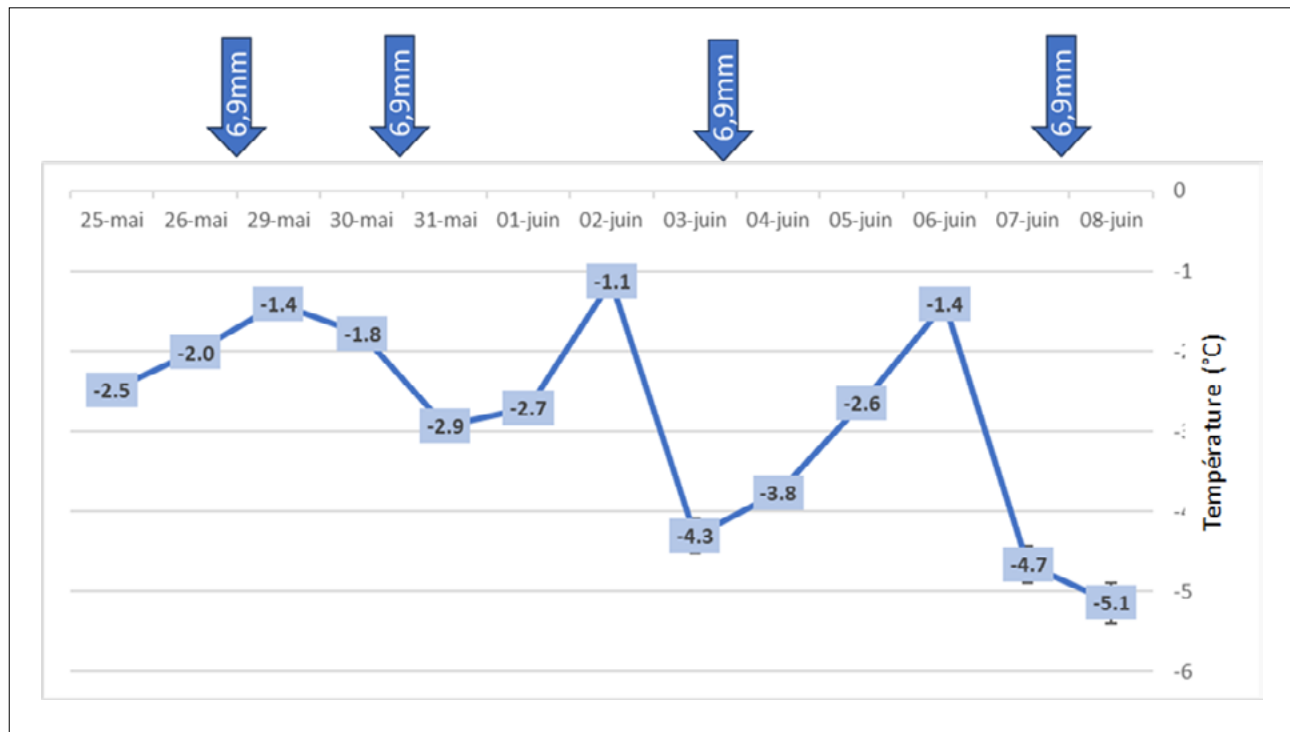
Dans la suite de cet article, nous concentrons nos résultats sur la modalité H50. Cette modalité a été choisie comme illustrative de l'effet de la restriction hydrique, avec un régime d'irrigation modéré, plus proche d'une certaine réalité en termes de pratiques culturales que la modalité H25.

3.2.1 Écart de température entre la canopée et l'air

La différence entre la température foliaire et la température de l'air est présentée à la figure 6. Ces mesures ont été réalisées durant une période climatique caractérisée par une faible variation du rayonnement global (2463 - 2952 W m⁻² avec un écart-type de 149 W m⁻²) et de la température moyenne journalière (30-37 °C avec un écart-type de 2,3 °C) entre 10 h et 16 h du 25 mai au 8 juin 2023. On peut voir que dans ces conditions, la différence de température a beaucoup fluctué, en raison notamment des événements d'irrigation. Plus la différence de température est faible, plus la plante est en situation de stress hydrique (Gölgül *et al.*, 2022). La différence de température semble être surestimée, car celle-ci est très importante, pouvant atteindre -5,1 °C, la littérature montre normalement des différences entre -0,5 °C et -4 °C lorsque les apports d'eau sont réduits à 25 % des apports de confort (Gölgül *et al.*, 2022; Celiktopuz, 2023). Ce biais peut être expliqué par l'ombre portée du capteur. Malgré ce biais, il est tout de même possible d'interpréter les valeurs des températures de feuillage de manière comparative. Ces valeurs nous ont permis de calculer le CWSI empirique (eq. (4)) en considérant la différence de température minimale (1,1 °C dans notre cas) comme la limite supérieure en condition d'arrêt de la transpiration de la plante et la différence de température maximale (5,1 °C dans notre cas) comme la limite inférieure représentant la situation de confort hydrique.

Figure 6 : Écart de température entre la canopée et l'air sur la modalité H50 %. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard ($n = 3$). Les flèches bleues représentent les dates et doses d'irrigation.

Figure 6: Temperature difference between air and canopy on treatment H50 %. Error bars represent standard error ($n = 3$). The blue arrows represent irrigation dates and rates.



3.2.2 Suivi des 3 indicateurs

La *figure 7* présente les valeurs journalières d'humidité volumique du sol (*figure 7A*), d'évapotranspiration potentielle (ETP, *figure 7B*), et de Crop Water Stress Index (CWSI, *figure 7C*), de la modalité H50 %. Durant la période étudiée allant du 25 mai au 8 juin, les fraisiers se sont retrouvés en périodes de stress modéré à plusieurs reprises, illustrées par des valeurs de teneur en eau volumique du sol en dessous du seuil de teneur en eau au point de flétrissement temporaire (réserve difficilement utilisable, RDU zone colorée en vert, *figure 7A*). A chaque irrigation, les capteurs capacitifs ont bien mesuré l'arrivée de l'eau dans le sol avec des augmentations de valeurs de la teneur en eau.

Sur cette période l'ETP a varié entre 4,4 et 6,5 mm (*Figure 7B*) témoignant de valeurs cohérentes à la période des mesures dans la région angevine (Météo France, 2019). Concernant le CWSI (*Figure 7C*), la gamme de valeurs observées avant les irrigations est comparable à celles observées par d'autres auteurs (Testi *et al.*, 2008 ; Costa *et al.*, 2020 ; Gölgül *et al.*, 2022). Nous pouvons également voir qu'un CWSI élevé (stress hydrique important) est souvent synonyme d'une humidité volumique faible (valeurs inférieures à l'humidité au point de flétrissement temporaire (zone verte RDU), voire permanent (zone orange RNU), à l'inverse d'un CWSI faible (stress hydrique faible) qui est souvent

synonyme d'une humidité volumique importante, supérieure à l'humidité au point de flétrissement temporaire. Cependant, certains cas de figure comme le 30 mai montrent un CWSI fort alors que la teneur en eau volumique du sol est importante. Si la décision d'irrigation était basée seulement sur le CWSI un déclenchement le 30 mai pourrait conduire à un dépassement de l'humidité à la capacité au champ et par conséquent une perte d'eau par drainage voire par ruissellement. À l'inverse, le 5 juin la teneur en eau volumique est inférieure à l'humidité au point de flétrissement temporaire alors que le CWSI est lui resté moyen, si la décision d'irrigation était basée seulement sur le remplissage du réservoir utilisable, nous aurions apporté de l'eau à un moment où la plante avait un stress moyen, qui ne justifierait pas nécessairement un apport d'eau. Nous voyons donc que le croisement des indicateurs permettrait de faire l'impasse sur des apports d'eau, contribuant à préserver la ressource.

Nous avons voulu vérifier si la profondeur racinaire du fraisier était bien de 10 cm comme observé dans la littérature. Un profil racinaire par modalité d'irrigation a été réalisé dans le rang et centré sur un plant de fraisier. Il s'est avéré que le système racinaire s'est développé sur 20 cm de profondeur. Ainsi, même si les fraisiers ont montré des signes de stress hydrique, et une perte de rendement, il est possible qu'une

Figure 7 : indicateurs de suivi du stress hydrique dans les cultures du fraisier, du 25 mai au 8 juin : (A) humidité volumique du sol mesurée par capteurs, (B) évapotranspiration potentielle (ETP), et (C) Crop Water Stress Index (CWSI). Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standard (n = 3). Les flèches bleues au-dessus des graphiques représentent l'irrigation.

Figure 7: Indicators for monitoring water stress in strawberry crops from May 25 to June 8: (A) soil volumetric water content measured by sensors (B) potential evapotranspiration (PET), and (C) Crop Water Stress Index (CWSI). Error bars correspond to standard errors (n = 3). Blue arrows above graphs represent irrigation.

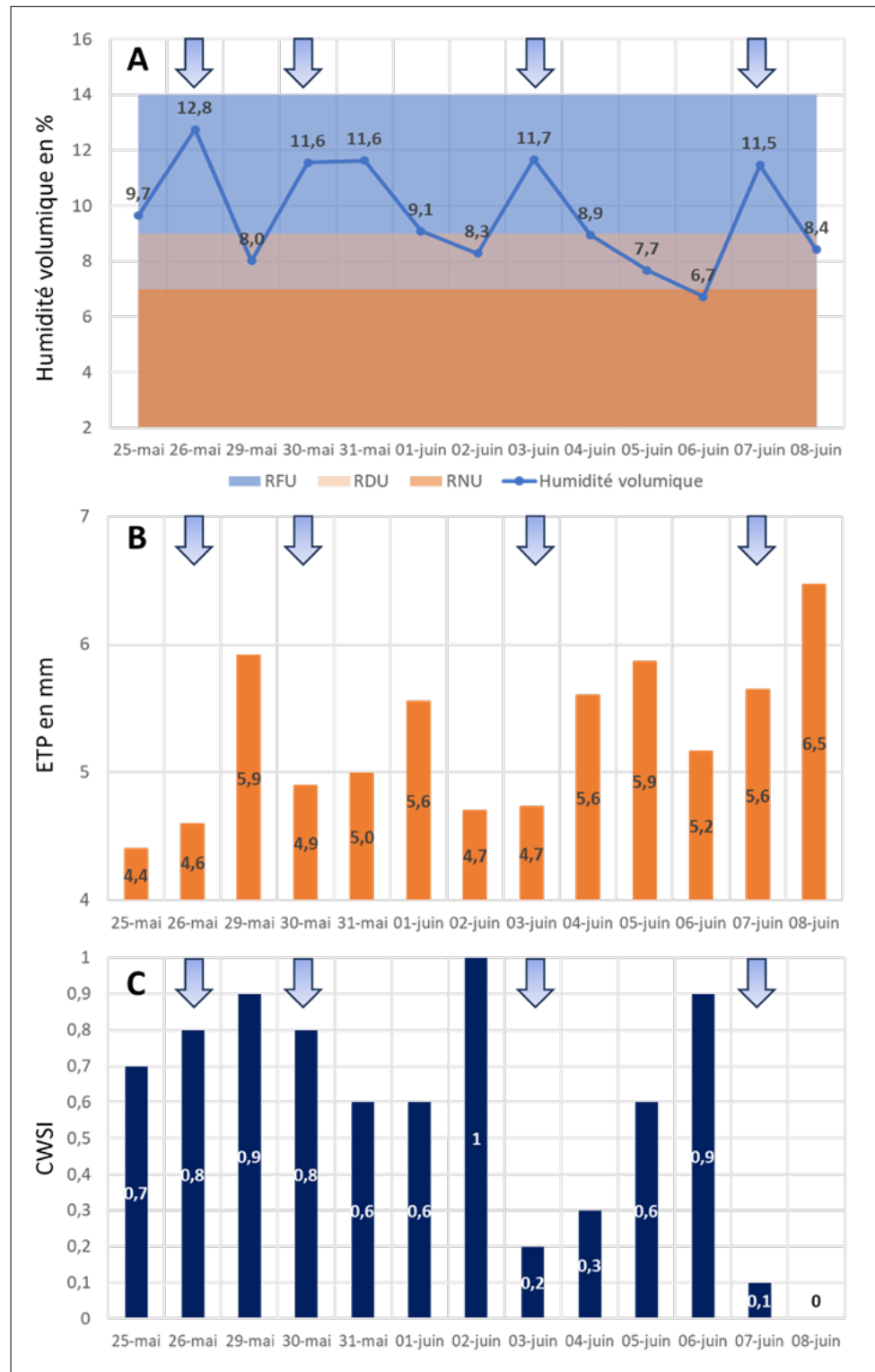
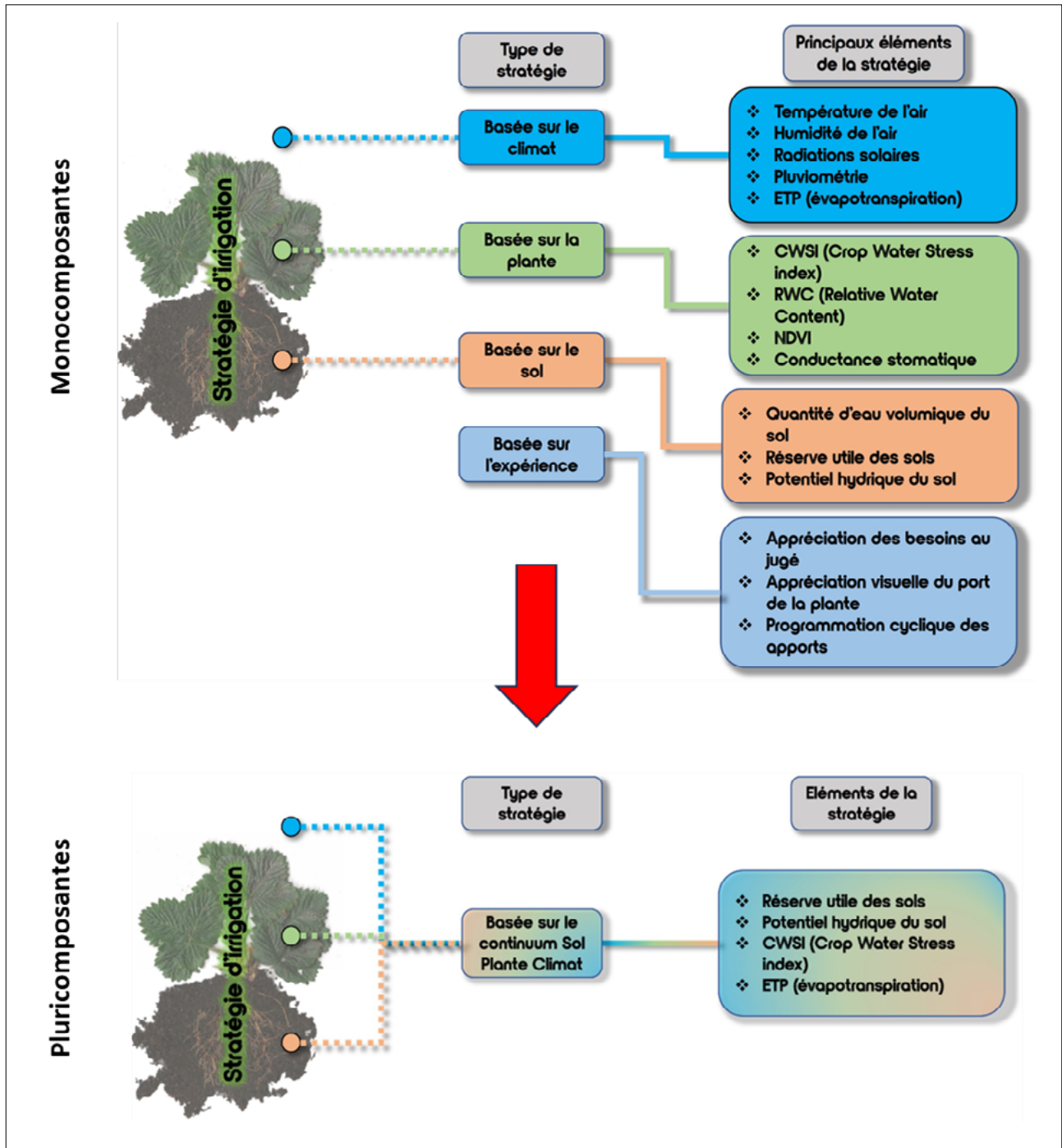


Figure 8 : Comparaison des stratégies d'irrigation en temps réel : approche mono-composantes vs pluri-composantes basée sur le sol, la plante et le climat. Adapté de Mussard et Cannavo (2023).

Figure 8: Comparison of real-time irrigation strategies: single component vs. multi-component approach based on soil, plant, and climate. Adapted from Mussard et Cannavo (2023).



réserve hydrique substantielle entre 10 et 20 cm ait pu modérer l'intensité du stress hydrique.

3.3. Pistes de réflexion pour un outil d'aide à la décision de l'irrigation innovant

Les stratégies d'irrigation sont souvent basées sur un seul type de stratégie, soit basée sur le climat, soit sur la plante, soit sur le sol (Erion *et al.*, 2022). Bien que ce type de stratégie mono-composante soit avantageux en termes de coût et de facilité de mise en place, il ne représente pas l'état hydrique global du continuum sol-plante-climat. Il est important de noter qu'une faible teneur en eau du sol ne signifie pas nécessairement une demande hydrique de la plante en cas de temps couvert, et qu'un CWSI important dû à des conditions climatiques extrêmes ne nécessite pas forcément une irrigation si la réserve utile est pleine. La mise en place de stratégies pluri-composantes impliquant le sol, le climat et la plante permet de surveiller l'état hydrique global du système et de déterminer le moment optimal pour irriguer la culture, tout en optimisant la quantité d'eau nécessaire. La *figure 8* schématise le passage d'une stratégie mono-composante vers une stratégie pluri-composantes.

Cependant, cela nécessite des compétences techniques et scientifiques solides en matière de gestion et de pilotage de l'irrigation. De plus, ces solutions ne sont pas largement disponibles sur le marché, car elles sont peu nombreuses à être prêtes à l'emploi pour les producteurs et nécessitent un investissement financier important. Un exemple de règle de décision du pilotage de l'irrigation pluri-composantes en se basant sur l'humidité volumique du sol et sur le CWSI a été récemment développé par Jamroen *et al.* (2020). Cette règle de décision croise les valeurs de teneur en eau du sol et du CWSI. Selon les valeurs de ces 2 composantes, la décision d'irriguer

est prise ou non. Ces auteurs ont comparé cette stratégie à deux autres modalités d'irrigation : l'irrigation manuelle basée sur l'expérience du producteur, et l'irrigation basée sur le temps (programmeur). Ces travaux appliqués à la culture de *Brassica juncea* ont montré sur une période de 10 jours des résultats prometteurs. La combinaison de deux indicateurs a permis de réduire de 50 % et de 61 % respectivement la quantité d'eau utilisée par rapport aux méthodes de programmation et manuelle. De plus, les auteurs ont constaté une augmentation de 5 % du rendement des cultures par rapport à l'irrigation programmée. Cette approche s'avère donc très efficace pour optimiser l'irrigation des cultures tout en utilisant les ressources en eau de manière plus rationnelle et en améliorant le rendement des cultures.

En se basant sur les travaux de ces auteurs, nous proposons un outil d'aide à la décision qui prend en compte un indicateur supplémentaire, l'évapotranspiration (ETP). Il s'agit en effet d'une mesure bioclimatique de référence facilement accessible (par Météo-France), qui traduit les conditions du micro-climat en termes de demande en eau par les plantes, et indépendamment de l'espèce étudiée. Le *tableau 6* illustre la conception de l'outil.

Chaque indicateur a été normalisé afin d'obtenir une note comprise entre 0 et 1. La normalisation est linéaire. Les seuils de notation sont une proposition et une piste de réflexion, basés à la fois sur les résultats de ce travail et sur la bibliographie, et qui méritent d'être affinés à court terme :

- Réserve en eau du sol : 0 signifie un réservoir facilement utilisable plein, 1 signifie un réservoir facilement utilisable vide. À partir d'une valeur d'indicateur supérieure ou égale à 0,5, la réserve en eau du sol est dans la RDU, et à partir de 0,9, elle est dans la RNU.
- ETP : 0 signifie des conditions climatiques non stressantes (ETP nulle), 1 signifie des conditions climatiques extrêmes

Tableau 6 : Règles de décision pour un outil pluri-composantes de pilotage de l'irrigation. La signification des symboles est la suivante : symboles "--" confort hydrique élevé, "-" confort hydrique satisfaisant, "+" stress hydrique modéré, "++" stress hydrique fort. Les deux encadrements en violet correspondent aux situations où l'irrigation est obligatoire.

Table 6: Decision rules for a multi-component irrigation control tool. The meaning of the symbols is as follows: symbols "--" high water comfort, "-" satisfactory water comfort, "+" moderate water stress, "++" high water stress. The two purple boxes correspond to situations where irrigation is compulsory.

Indicateurs	Note de l'indicateur										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Sol (Réserve en eau)	--	--	--	-	-	+	+	+	+	++	++
Climat (ETP)	--	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
Plante (CWSI)	--	-	-	-	+	+	+	+	++	++	++

(ETP journalière maximale observée en moyenne sur les 10 dernières années en Anjou (8 mm)). Lorsque la note est supérieure ou égale à 0,5 (supérieure à 4 mm dans notre exemple), la transpiration des plantes est supposée suffisamment importante, pour témoigner d'une activité de dessèchement du sol non négligeable.

- CWSI: 0 signifie un stress hydrique du végétal nul, 1 signifie un stress du végétal maximal (blocage de la transpiration). Les valeurs seuils de bascule dans des conditions de stress modéré (à partir de 0,4) et fort (à partir de 0,8) se basent sur des résultats issus de la bibliographie (Adeyemi *et al.*, 2018; Blaya-Ros *et al.*, 2020; Sanchez-Pinero *et al.*, 2022; Ekinzogh *et al.*, 2020).

Sur la base des 3 notes issues de ces indicateurs, le déclenchement de l'irrigation est activé dans les conditions suivantes: (1) si les trois notes sont dans la catégorie "+", (2) si une des trois notes est "++" et qu'il n'y a aucune note "--". À titre d'exemple, le *tableau 7* illustre la mise en œuvre de l'outil multi-composantes à deux dates, le 30 mai et le 4 juin. En se basant uniquement sur le statut hydrique du sol, le 30 mai une irrigation ne serait pas nécessaire. Néanmoins, la valeur critique du CWSI impose une irrigation. À l'inverse, le 4 juin malgré une faible teneur en eau du sol, la CWSI ne montre pas de signe de stress hydrique, l'irrigation peut être évitée.

On observe donc que dans certains cas ce n'est pas la réserve en eau qui constitue le facteur le plus important de décision, mais la demande en flux d'eau journalière que ce soit dans un sens ou l'autre (soit irriguer parce que la plante ne reçoit pas le flux dont elle a besoin, soit faire l'impasse parce que le flux demandé est faible). Il faut aussi souligner qu'il existe une forte incertitude dans ces calculs théoriques basés sur des mesures de laboratoires de « RFU » « RDU ». Les critères de seuils des pressions appliquées peuvent différer de la réalité de la capacité d'absorption racinaire *in situ*. Ceci souligne l'importance d'une approche multi-composantes.

En perspectives, cette pratique pourrait également stimuler la croissance des plantes en favorisant le développement de systèmes racinaires plus profonds et plus résistants aux stress hydriques. En effet, en cas de stress hydrique, le système racinaire des plantes subit plusieurs adaptations pour faire face

à la pénurie d'eau. Initialement, les racines peuvent croître de manière latérale pour absorber l'eau disponible sur une plus grande surface. Ensuite, les racines peuvent également croître en profondeur pour rechercher l'eau dans les couches plus profondes du sol. De plus, certaines plantes peuvent développer des racines pivotantes qui descendent verticalement pour accéder à l'eau en profondeur.

4. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de suivre le stress hydrique d'une culture à partir d'indicateurs des compartiments sol (teneur en eau volumique du sol), plante (Crop Water Stress Index, CWSI) et microclimat (évapotranspiration potentielle, ETP). Parce que les différentes modalités d'irrigation ont eu un impact significatif sur le recouvrement foliaire et sur la production des fraisiers, il était intéressant d'étudier l'intérêt de leur combinaison pour le déploiement des règles de décision en irrigation. Les conditions météorologiques durant l'essai expérimental ont permis de caractériser une seule mais longue période de stress hydrique sur les végétaux, ce qui a permis d'obtenir un jeu de données suffisant. Les indicateurs choisis ont permis de bien mettre en évidence l'effet des régimes d'irrigation. L'utilisation de règles de décision d'irrigation pluri-composantes intégrant le sol, la plante et le microclimat proche du végétal semble prometteuse pour économiser de l'eau. Il convient désormais d'éprouver ce concept d'irrigation innovante par des expérimentations avec comparaison aux pratiques d'irrigation conventionnelles. C'est de cette manière que les économies d'eau substantielles pourront être mesurées. De plus, cet outil pourrait être utilisé dans le cadre d'une culture en stress hydrique maîtrisé, qui permet d'optimiser l'utilisation de l'eau en réduisant sa consommation, ce qui est bénéfique pour les régions où les ressources hydriques sont limitées.

Tableau 7 : Mise en application de l'outil multicritère.

Table 7: Application of the multi-criteria tool.

Date	Indicateur	Valeur	Note	Irrigation (Oui/Non)
30 mai	Réserve en eau	0,33	--	Oui
	ETP	0,61	+	
	CWSI	0,80	++	
4 juin	Réserve en eau	0,70	+	Non
	ETP	0,70	+	
	CWSI	0,30	-	

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet Aqualeaves. Ils ont été menés au sein de l'unité Environnement Physique de la plante Horticole (EPHor) de l'Institut Agro Rennes-Angers, dont nous remercions notre technicien Dominique Lemesle. Nous remercions le personnel de la plateforme PHENOTIC Semences & Plantes pour la mise à disposition à titre gracieux des parcelles et de son personnel technique, ainsi que la pépinière Anjou Plants pour nous avoir offert les 800 plants de fraisiers. Enfin, nous remercions le pôle de compétitivité Végépolys Valley qui a soutenu financièrement ce projet grâce au Concours Innovation 2022, dont Hugo Mussard a été le lauréat.

BIBLIOGRAPHIE

- Adeyemi O., Grove I.G., Peets S., Domun Y., Norton T. (2018). Dynamic modelling of the baseline temperatures for computation of the crop water stress index (CWSI) of a greenhouse cultivated lettuce crop. *Computers and Electronics in Agriculture*, 153, 102-114.
- AFES. (2008). *Référentiel Pédologique*. Baize D., Girard, M.C. (Eds). Association française pour l'étude du sol. Editions Quæ, Versailles, France. ISBN : 978-2-7592-0185-3.
- Blaya-Ros p.J., Blanco V., Domingo R., Soto-Valles F., Torres-Sánchez R. (2020). Feasibility of Low-Cost Thermal Imaging for Monitoring Water Stress in Young and Mature Sweet Cherry Trees. *Applied Sciences*, 10, 5461.
- Bosc J.-p., Bardet A. (2014). *Le fraisier : physiologie et types de plants*. Paris : CTFIL., 131 p.
- Bouthier A., Scheurer O., Seger M., Lagacherie p., Beaudoin N., Deschamps T., Sauter J., Fort J., Cousin I. (2022). Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures Guide d'estimation. Arvalis., 102p
- Bruand A., Duval O., Cousin I. (2004). Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Étude et Gestion des Sols*, 11, 323-334.
- Bwambale E., Abagale F.K., Anornu G.K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324.
- Celiktopuz E. (2023). Determination of drought tolerance of different strawberry genotypes. *PeerJ*, 11, e14972.
- Cheng M., Sun C., Nie C., Liu S., Yu X., Bai Y., Liu Y., Meng L., Jia X., Liu Y., Zhou L., Nan F., Cui T., Jin X. (2023). Evaluation of UAV-based drought indices for crop water conditions monitoring: A case study of summer maize. *Agricultural Water Management*, 287, 108442.
- Çolak Y.B., Yazar A., Çolak İ., Akça H., Duraktekin G. (2015). Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for Eggplant under Varying Irrigation Regimes Using Surface and Subsurface Drip Systems. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 372-382.
- Costa J.D.O., Coelho R.D., Barros T.H.D.S., Fraga Júnior E.F., Fernandes A.L.T. (2020). Canopy thermal response to water deficit of coffee plants under drip irrigation. *Irrigation and Drainage*, 69, 472-482.
- Despinasse Y. (2015) *Diversité chimique et caractérisation de l'impact du stress hydrique chez les lavandes*. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet Saint Etienne., 180 p.
- Kanjo Ekinzog E., Schlerf M., Kraft M., Werner F., Angela Riedel A., Rock G., KMallick K. (2022). Revisiting crop water stress index based on potato field experiments in Northern Germany. *Agricultural Water Management*. 269, 107664
- Gonzalez-Dugo V., Zarco-Tejada p.J., Fereres E. (2014). Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198-199, 94-104.
- Gouvernement français (2023). 53 mesures pour l'eau. Planification écologique, plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/MAR2023_DP-PLAN%20EAU__BAT%20%281%29_en%20pdf%20rendu%20accessible.pdf, consulté le 5 décembre 2023
- Gölgül İ., Kırnak H., İrik H.A. (2022). Yield Components and Crop Water Stress Index (CWSI) of Mung Bean Grown Under Deficit Irrigations. *Gesunde Pflanzen*.
- Ihuoma S.O., Madramootoo C.A. (2017). Recent advances in crop water stress detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 267-275.
- Jamroen C., Komkum p., Fongkerd C., Krongpha W. (2020). An Intelligent Irrigation Scheduling System Using Low-Cost Wireless Sensor Network Toward Sustainable and Precision Agriculture. *IEEE Access*, 8, 172756-172769.
- Klamkowski K., Treder W. (2006). Morphological and Physiological Responses of Strawberry Plants to Water Stress., 71.
- Limpus S. (2009). Isohydic and anisohydic characterisation of vegetable crops. The classification of vegetables by their physiological responses to water stress. Available at: <http://era.daf.qld.gov.au/id/eprint/3052/>.
- METEO-FRANCE. - De nouvelles normales pour qualifier le climat en France, <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/de-nouvelles-normales-pour-qualifier-le-climat-en-france#:-:text= Toujours %20plus %20chaud,de %201%2C7 %20%2C2 %20%20C2 %20B0C.> (2022). Consulté le 9 mars 2023
- Morel R. (1996). *Les sols cultivés*. Tec et Doc, Paris, 389 p.
- Mussard H., Cannavo P. (2023). Les indicateurs de stress hydrique des végétaux et leur applicabilité en irrigation de précision. *BIO 2490*, 1-21
- Monteith J.L. (1973). *Principles of environmental physics*. London: Edward Arnold.
- Ramananjatovo T., Chantoiseau E., Guillermin p., Guénon R., Delaire M., Buck-Sorlin G., Cannavo P. (2021). Growth of Vegetables in an Agroecological Garden-Orchard System: The Role of Spatiotemporal Variations of Microclimatic Conditions and Soil Properties. *Agronomy*, 11, 1888.
- Richards L.A. (1947). Pressure membrane apparatus: construction and use. *Agric Eng*, 28, 451-454
- Sánchez-Piñero M., Martín-Palomo M.J., Andreu L., Moriana A., Corell M. (2022). Evaluation of a simplified methodology to estimate the CWSI in olive orchards. *Agricultural Water Management*, 269, 107729.
- Testi L., Goldhamer D.A., Iniesta F., Salinas M. (2008). Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. *Irrigation Science*, 26, 395-405.
- Wang X., Zhao C., Guo N., Li Y., Jian S., Yu K. (2015). Determining the Canopy Water Stress for Spring Wheat Using Canopy Hyperspectral Reflectance Data in Loess Plateau Semiarid Regions. *Spectroscopy Letters*, 48, 492-498.
- Wittling C., Ruelle p. (2022). *Guide pratique de l'irrigation (4^e édition)*. Quæ. 354 p.
- Yenni, Ibrahim M.H., Nulit R., Sakimin S.Z. (2022). Influence of drought stress on growth, biochemical changes and leaf gas exchange of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) in Indonesia. *AIMS Agriculture and Food*, 7, 37-60.

