

Combinaison de modèles de bilan hydrique et d'indicateurs de stress hydrique pour le pilotage de l'irrigation : étude de cas au Portugal

Après avoir présenté le contexte de l'irrigation au Portugal, les auteurs de cet article examinent la robustesse de deux approches et leur combinaison afin de mieux programmer les campagnes d'irrigation à l'échelle de la parcelle. Deux cas d'application sont présentés et discutés : l'un sur des cultures horticoles à enracinement superficiel (piment, *Capsicum annuum L.*) et l'autre sur des cultures avec racines ligneuses profondes (olivier, *Olea europea 'Arbequina'*).

Irrigation au Portugal

Contexte

Malgré les fortes divergences climatiques observées au Portugal, l'irrigation n'en demeure pas moins une nécessité afin de garantir des rendements rentables pour la plupart des cultures. La figure 1a illustre des situations extrêmes de précipitations moyennes et de l'évapotranspiration de référence (Viana do Castelo, dans une région côtière du nord-ouest et Beja, une région intérieure du sud-est). Pour les deux cas, on peut noter une nette situation de déficit en eau en fin de printemps et en été, mais ce déficit est beaucoup plus accentué dans le cas de Beja.

En plus de la variation climatique, d'autres différences marquées caractérisent le nord et le sud du pays (figure 1b). Le Tage (Tejo en portugais) qui coule de la frontière orientale de l'Espagne à la côte ouest (selon un angle d'environ 45° avec le nord), divise le Portugal en deux vastes régions. Au nord du Tage, la zone est couverte de vallées, les pentes y sont fortes et les sols peu profonds, à l'exception des grandes vallées fluviales. Au sud du fleuve, la topographie se caractérise par des plaines ondulées, et la profondeur du sol a tendance à s'accroître.

Paradoxalement, la densité de population est, et a toujours été, plus grande dans la région nord (les zones montagneuses exceptées). Cela s'explique par un déficit

en eau plus réduit et sur une période plus courte dans le nord-ouest, améliorant le rendement des cultures. Ces différences sont accentuées par l'asymétrie sociale et économique, les petites exploitations et l'agriculture familiale étant prédominantes dans le nord.

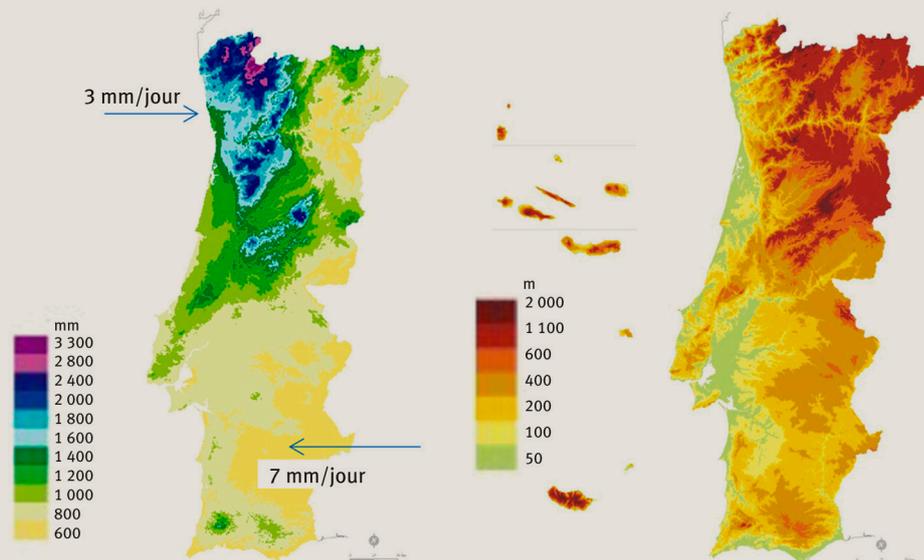
Des différences si prononcées ont de forts impacts sur le secteur de l'irrigation, rendant difficile une analyse globale sur l'ensemble du pays. Lorsque cela est possible, notre analyse prendra donc en compte les sept « régions agraires » du Portugal (anciennes divisions administratives récemment remplacées par les cinq régions NUT II¹ établies par la Commission européenne : le nord, le centre, Lisbonne et la Vallée du Tage, Alentejo et Algarve) :

- Entre-Douro-e-Minho (nord-ouest) ;
- Trás-os-Montes (nord-est) ;
- Beira Litoral (littoral centre) ;
- Beira Intérieure (intérieur centre) ;
- Ribatejo e Oeste (zone littorale proche de Lisbonne et de la Vallée du Tage) ;
- Alentejo ; et
- Algarve (extrême sud).

Au Portugal, les terres irrigables ont toujours constitué moins de 25 % de la superficie agricole utile, chiffre aujourd'hui proche de 15 % (tableau 1). Au cours des dernières décennies, les terres irrigables et irriguées ont marqué un recul sensible.

1. Nomenclature d'unités territoriales statistiques, le niveau II caractérisant les NUT de 800 000 à 3 millions d'habitants.

- ❶ À gauche : précipitations annuelles (moins de 600 mm et plus de 3 300 mm, évapotranspiration sur la base des références du mois de juillet à Viana do Castelo et Beja, moyenne sur 30 ans).
 À droite : carte hypsométrique (jusqu'à 2 000 m) du Portugal.
 Source: <https://snirh.apambiente.pt/>



Le tableau ❷ indique que l'option de l'irrigation sous pression dépend dans une grande mesure du type de culture : 91 % des cultures permanentes (vergers, oliviers, vignobles) sont irriguées au goutte-à-goutte. D'autre part, les deux tiers de la superficie de pâturage sont irrigués par gravité.

Comme l'illustre le tableau ❸, la part des systèmes gravitaires par rapport aux systèmes sous pression est en lien étroit avec l'irrigation pratiquée dans les petites exploitations. Lorsque celle-ci est dominante – dans les régions agricoles du nord (Entre-Douro-e-Minho et Trás-os-Montes) et le littoral centre (Beira Littoral) – les systèmes gravitaires sont encore prédominants, alors que dans les régions sud, c'est plutôt l'irrigation par aspersion et goutte-à-goutte qui est pratiquée. Le coût et la disponibilité de l'eau semblent également jouer un rôle, ce qui explique que dans la région de l'Algarve, où l'irrigation s'appuie sur des eaux souterraines provenant de puits profonds, le rapport entre l'irrigation sous pression et celle par gravité est plus élevé, bien que la plupart des terres soient occupées par les petits exploitants.

Au Portugal, il y a trente-deux programmes collectifs d'irrigation majeurs, dont la plupart dépendent de grands barrages réservoirs. Ces programmes ont été réalisés à travers des investissements publics et contribuent dans une grande mesure à la lutte contre le dépeuplement tout en favorisant le développement. Avec la mise en place récente du projet d'irrigation d'Alqueva, (120 000 ha), les programmes publics d'irrigation ont connu une forte croissance. Cependant, la plupart des terres irrigables appartiennent encore à des systèmes privés, soit individuels, soit collectifs (tableau ❹).

❶ Parcelle irrigable (équipée) et parcelle irriguée.

Utilisation des sols	Terres agricoles utilisées		Terres irrigables équipées		Terres irriguées	
	ha	(%)	ha	(%)	ha	(%)
Région agricole						
Entre Douro e Minho	211 154	94 829	45 %	81 858	39 %	
Trás-os-Montes	432 873	46 666	11 %	38 852	9 %	
Beira Litoral	125 436	61 116	49 %	51 314	41 %	
Beira Interior	337 031	49 580	15 %	35 649	11 %	
Ribatejo e Oeste	391 006	112 539	29 %	101 208	26 %	
Alentejo	1 956 508	155 123	8 %	138 231	7 %	
Algarve	88 297	16 274	18 %	16 170	18 %	
Portugal continental	3 542 305	536 127	15 %	464 283	13 %	

❷ Terres irriguées selon les grands groupes de cultures et systèmes d'irrigation.

Système d'irrigation	Gravité		Asperseurs et goutte-à-goutte		Total
	ha	%	ha	%	
Grands groupes de cultures					
Cultures permanentes	12 245	9	123 254	91	135 499
Cultures temporaires	99 993	36	177 131	64	277 124
Pâturages	34 443	66	17 561	34	52 004
Total	146 681	32	317 946	68	464 627

3 Terres irriguées selon les régions agricoles et systèmes d'irrigation.

Région agricole	Système d'irrigation		Asperseurs et goutte-à-goutte		Total ha
	Gravité		ha	%	
Entre Douro e Minho	46 809	57	35 268	43	82 077
Trás-os-Montes	27 942	70	11 930	30	39 872
Beira Litoral	25 454	50	25 908	50	51 362
Beira Interior	11 084	31	24 575	69	35 659
Ribatejo e Oeste	19 120	19	82 120	81	101 240
Alentejo	14 653	11	12 695	89	138 248
Algarve	1 618	10	14 552	90	16 170
Portugal continental	146 680	32	317 948	68	464 628

4 Systèmes irrigués selon les systèmes privés et collectifs.

Association des utilisateurs d'eau et Sociétés publiques d'irrigation		Régime privés		Total ha
ha	%	ha	%	
135 300	25	400 827	75	536 127

5 Distribution selon les cultures irriguées.

Type de cultures	Superficie (ha)	%
Blé	5 770	1,2 %
Maïs	81 190	17,5 %
Riz (Paddy)	29 250	6,3 %
Fourrage	87 807	18,9 %
Pâturage	51 661	11,1 %
Pomme de terre	11 834	2,5 %
Tournesol	4 093	0,9 %
Tomate pour l'industrie	17 943	3,9 %
Autres cultures maraîchères	10 025	2,2 %
Légumes	14 654	3,2 %
Agrumes	15 048	3,2 %
Autres fruits frais	25 683	5,1 %
Oliviers	65 887	14,2 %
Vignoble	25 181	5,4 %
Autres cultures	20 706	4,5 %
Total	464 731	100,0 %

6 Indicateurs de surfaces irriguées par région agricole.

Région agricole	Indicateurs	Moyenne de la surface irriguée	Consommation unitaire
		(ha/exploitation)	(m ³ /ha)
Entre Douro e Minho		1,9	6 662
Trás-os-Montes		1,8	6 331
Beira Litoral		1,4	8 253
Beira Interior		2,3	7 929
Lisboa e vale do Tejo		7,3	7 787
Alentejo		18,5	6 937
Algarve		2,6	9 973
Portugal continental		3,2	7 349

Les cultures irriguées sont très diversifiées (tableau 5), avec une dominance partagée du maïs (17,5 %), du fourrage (18,9 %) et de l'olivier (14,2 %). Les pâturages (11,1 %) et les vergers (8,3 %) jouent également un rôle important.

Afin de finir ce tour d'horizon de l'irrigation portugaise, le tableau 6 met en évidence quelques indicateurs intéressants ainsi que leurs différences régionales.

Comme déjà mentionné, l'agriculture portugaise est caractérisée par de petites exploitations (dont 72, 3 % couvrent moins de cinq hectares). Les superficies irriguées sont légèrement plus petites, environ deux hectares par exploitation, à l'exception de la Vallée du Tage et Alentejo.

En ce qui concerne les besoins en irrigation, on peut constater que, de manière générale, la consommation des cultures est réduite vers le sud car la pluviosité diminue alors que les températures moyennes augmentent, ce qui accroît constamment les besoins en irrigation dans les régions sud. L'exception que représente Alentejo s'explique facilement par le fait que les besoins en irrigation pour les oliviers et les vignobles, qui y sont largement représentés, sont très faibles.

Pilotage de l'irrigation

Dans ce contexte, la gestion de l'eau à l'échelle parcellaire consiste à prendre des décisions importantes sur deux aspects généralement considérés comme les composantes stratégiques du pilotage de l'irrigation (quel volume d'eau appliquer, et quand l'appliquer), que ce soit en période de confort ou de stress hydrique modéré. Par confort, on sous-entend le maintien de la plante à son taux d'évapotranspiration le plus élevé en fonction des conditions météorologiques et des conditions physiques des cultures (évapotranspiration des cultures, *ETc*, sans stress hydrique), lesquelles conditions sont souvent associées aux rendements maximums. Une situation de stress hydrique modéré présuppose une réduction de l'*ETc* par des stratégies d'irrigation déficitaire. Il faut noter ici que les différents aspects d'application de l'eau ne sont pas analysés (techniques d'irrigation, taux d'application de l'irrigation, et ainsi de suite).

Il est devenu courant, dans la littérature, d'utiliser, comme alternatives, deux moyens pour assurer une bonne gestion et déterminer quel volume d'eau est nécessaire et à quel moment, et ces processus seront nommés ci-après A et B.

A. L'approche du bilan hydrique, largement utilisée, qui peut être décrite comme suit : dans l'équation du bilan hydrique, l'évapotranspiration réelle (*ETa*) utilise les données d'entrée estimées par modèles simples, les autres données pertinentes (par ex. les précipitations, *P*) sont mesurées ou estimées, et constituent également des entrées pour le modèle. Cela permet à l'utilisateur d'obtenir, comme résultats, l'évolution du volume d'eau retenu dans le sol (volume-contrôle), et à partir d'un point de départ connu, de déterminer l'état hydrique du sol à un moment donné (équation 1). La position relative de cette valeur par rapport à quantité totale d'eau disponible dans le sol (*TAW*), ainsi que la stratégie à suivre, permet de décider de la hauteur d'eau d'irrigation à appliquer (parfois appelée quantité d'eau d'irrigation). Par exemple l'utilisateur peut estimer les besoins en eau (hauteur

d'eau d'irrigation) équivalents au déficit hydrique du sol s'il décide d'amener le sol à sa capacité au champ (FC), ou il peut décider d'appliquer moins d'eau, laissant le sol dans une certaine condition prédéfinie, en dessous de la capacité au champ.

B. L'approche des indicateurs de stress hydrique (mesures in situ automatisées ou non automatisées), qui n'est adaptée qu'aux indicateurs quantifiant le stress sur le court terme, normalement utilisée pour le pilotage de l'irrigation. Ces indicateurs peuvent être (pour ne mentionner que les plus testés) : la teneur en eau du sol, le potentiel de l'eau dans le sol, le potentiel hydrique foliaire avant l'aube, le potentiel hydrique de la tige juste après le midi solaire, plusieurs variables dérivées du diamètre de la tige, la transpiration relative ($\approx K_s$, par ex. avec les techniques de mesure du flux de sève), la température du feuillage (par ex. par détection du rayonnement infrarouge thermique émis (TIR), par télédétection ou par détecteurs de proximité).

Si ces deux approches sont utilisées séparément, il faut souligner que l'approche du **bilan hydrique (A)** visant à déterminer l'état hydrique du sol apporte une réponse directe à deux questions : quelle dose appliquer (hauteur d'eau d'irrigation, en mm, associée aux besoins en eau d'irrigation en général) et à quel moment irriguer. Cela correspond aux estimations de la quantité totale d'eau disponible dans le sol (TAW), basée sur les paramètres suivants du système : teneurs en eau du sol à la capacité au champ (FC) et au point de flétrissement permanent (PWP) exprimées en fraction volumétrique (respectivement, θ_{FC} et θ_{PWP} , en m^3 d'eau/ m^3 de sol), et au pourcentage d'eau facilement transpirable admissible, p (voir l'équation 6, appliquée dans le contexte d'un exemple de plante à racines peu profondes). Normalement, en l'absence d'études spécifiques, p est tirée des tableaux de la FAO (Allen *et al.*, 1998) et ajustée à l'ETc, selon les travaux précurseurs et enrichissants de Denmead et Shaw (1962).

Inversement, les **indicateurs de stress hydrique (B)** renseignent sur quand irriguer, si les seuils sont connus, et éventuellement, sur quelle quantité appliquer. Mais puisque dans ce cas précis une approche essais-erreurs est appliquée, l'approche B n'est pas recommandée pour le pilotage.

Aucune de ces possibilités (A ou B) n'est pleinement satisfaisante en soi. La liste d'incertitudes de la première approche est longue et ses limites ont fait l'objet de discussions poussées (par ex. : Ferreira, 2017). La connaissance de ces limites, principalement dans le cas de l'irrigation déficitaire des cultures non-herbacées a rendu la seconde approche plus populaire, ce qui est bien loin de rendre ses objectifs et résultats complets.

Plutôt que d'être considérée comme « alternatives », la combinaison de ces deux approches s'avère être une solution relativement courante, en usage actuellement – de manière plus ou moins empirique – pour le conseil aux exploitations en matière de pilotage d'irrigation. Ces deux résultats (A et B) peuvent être utilisés pour le contrôle et les ajustements, ou en vue d'obtenir de nouvelles informations. Un exemple d'utilisation expérimentale ainsi que les résultats découlant de cette combinaison dans une étude de cas portant sur des cultures

basses (avec racines peu profondes) est décrit brièvement (sans impliquer les mesures ETa). De plus, dans des expérimentations réalisées en oliveraie irriguée où l' ETa (et par conséquent Kc) avait été mesurée (plantes à racines profondes, résultats publiés), il a été possible d'aller plus loin, et une fonction de coefficient du stress obtenue expérimentalement a pu être comparée aux valeurs modélisées.

Plantes à racines peu profondes

L'expérimentation a eu lieu dans un champ de poivrons d'industrie (*Capsicum annum* L. 'Pompeo F1') irrigué au goutte-à-goutte situé dans une propriété privée (38° 57'07" N, 7°48'41" W, 226 m) près de Sousel (Portalegre), zone au climat tempéré de type méditerranéen (Csa), et au sol limoneux-sableux. Les goutteurs étaient espacés de 20 cm d'intervalle, avec un débit nominal de 0,75 L h⁻¹. Les plants ont été transplantés dans le champ le 4 mai 2018. Quatre sous-parcelles ont été constituées, deux avec une ligne simple (T1 and T3), et deux autres avec deux lignes doubles et du plastique entre elles (T2 and T4) ; deux devant être sous des conditions sans stress (T1 and T2) et deux sous stress (T3 and T4) ; de cette façon, la fonction stress était utilisée, et pour garantir différentes valeurs d'indice de surface foliaire (LAI) sur un seul côté par unité de surface. Le débit de l'irrigation était enregistré en permanence dans chacune des sous-parcelles.

Concernant l'application du bilan hydrique, la nomenclature suivante sera utilisée (voir les détails mentionnés plus bas) :

- eau stockée dans la zone racinaire du sol, pour le jour i : WS_i (en mm),
- variation quotidienne du stock d'eau : $\Delta WS = WS_{i+1} - WS_i$ (en mm),
- teneur volumétrique en eau du sol : θ (m^3/m^3),
- teneur volumétrique en eau du sol directement mesurée : θ_{meas} (m^3/m^3),
- teneur volumétrique en eau du sol modélisée : θ_{mod} (m^3/m^3).

Les deux approches (A and B) ci-dessus décrites ont été utilisées :

A. La modélisation de ETa fournit des données d'entrées pour l'équation du bilan hydrique afin d'obtenir la variation du stock d'eau dans le volume racinaire ($\Delta WS = WS_{i+1} - WS_i$ = résultat, voir équation 1) (ici, volume total d'eau stockée en mm, d'où ont été obtenus la diminution de l'eau du sol et la teneur volumétrique en eau du sol, équation 2).

B. L'indicateur de stress hydrique utilisé pour les plantes/cultures ou l'état hydrique du sol était la teneur en eau volumétrique mesurée directement par la méthode gravimétrique classique (détails dans Carrilho, 2019).

Les variables d'entrée de l'équation de bilan hydrique utilisées au pas de temps journalier [équation 1] sont l'eau stockée dans la zone racinaire du sol, pour la journée i (WS_i , en mm), les précipitations (P , en mm/jour) et la hauteur d'irrigation (I , en mm/jour), mesurées tous les deux, l' ETa estimée (en mm/jour) et, le cas échéant, le drainage estimé (D , en mm/jour) au-delà du volume de

► contrôle (zone racinaire). Le résultat visé est l'eau stockée dans la zone racinaire pour la journée d'après (WS_{i+1}) et ainsi de suite :

$$WS_{i+1} = WS_i + P_i + I_i - D_i - ETa_i \quad [1]$$

Afin de trouver le point de départ de WS_i , la fraction volumétrique ou la teneur en eau du sol (θ , m^3/m^3) était directement mesurée au jour $i = 1$ ($\theta_{meas,i}$) c'est-à-dire :

$$WS_i = z_{av,i} \times \theta_{meas,i} \quad [2]$$

où $z_{av,i}$ est la profondeur moyenne de la zone racinaire au jour i , définie comme le volume total occupé par les racines par unité de surface totale du sol.

La teneur volumétrique en eau du sol pour la journée d'après ($\theta_{mod,i+1}$) était approximativement obtenue de WS_{i+1} (équation 1) comme suit :

$$\theta_{mod,i+1} = WS_{i+1} / z_{av,i+1} \quad [3]$$

En comparant les valeurs estimées avec celles mesurées ($\theta_{meas,i+1}$), les paramètres principaux de l'estimation de l' ETa peuvent être ajustés de manière à ce que la meilleure correspondance entre les deux séries (modélisée et mesurée) soit trouvée. Les paragraphes suivants démontreront comment les paramètres cruciaux de cette approche simple ont été obtenus.

Variables et paramètres requis afin d'estimer ETa .

L'équation 1 a été utilisée afin d'effectuer les estimations de ETa :

$$ETa = ET_0 \times Kc \times Ks \quad [4]$$

où l'évapotranspiration de référence (ET_0 , en mm/jour) a été obtenue par l'équation de Penman-Monteith avec les conditions des cultures de référence (variables provenant d'une station météorologique standard et des paramètres de l'herbe tel que suggéré par Allen *et al.*, 1998), Kc a été prise en compte dans sa version simple (plutôt que

double), dans un premier temps d'après les tableaux actuels du même manuel FAO 56. Le coefficient de stress Ks , lorsqu'inférieur à 1, (ex. : quand $SWD > TAWp$), a été obtenu en utilisant un modèle simple (Allen *et al.*, 1998) :

$$Ks = (TAW - SWD) / [TAW \times (1 - p)] \quad [5]$$

où TAW représente le volume total d'eau disponible, SWD représente le déficit hydrique du sol, et la valeur de p fixée à 0,3, définissant l'eau facilement disponible ($RAW = TAW \times p$) pour laquelle la consommation d'eau n'est pas affectée ($Ks = 1$). Si SWD est inférieur à RAW , $Ks = 1$.

Le TAW est estimé comme d'ordinaire dans les applications d'ingénierie :

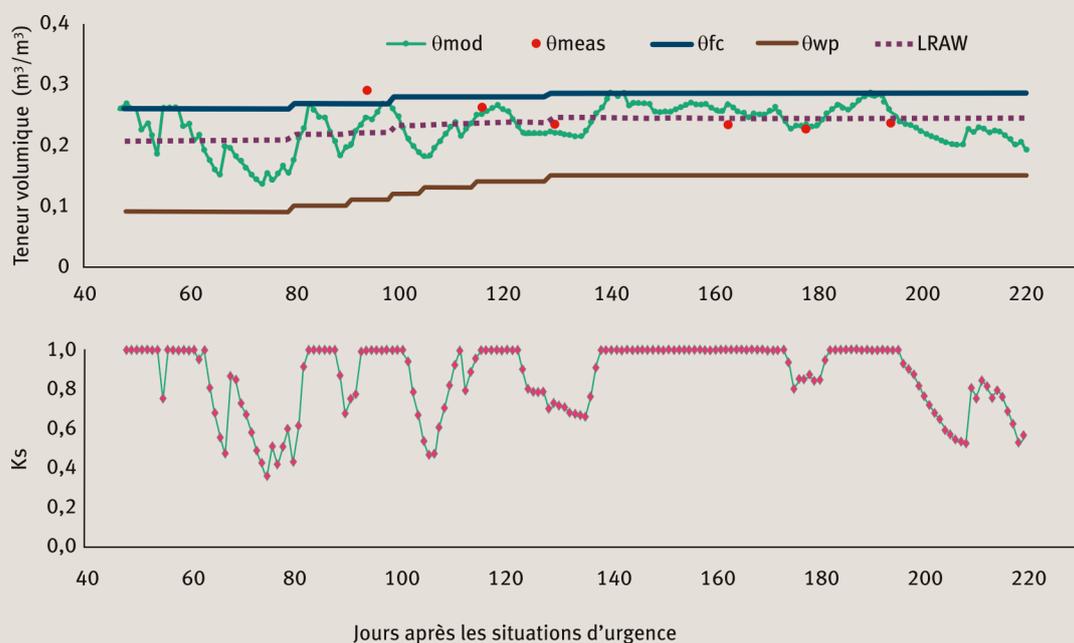
$$TAW = (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \times z_{av} \quad [6]$$

avec les paramètres θ_{FC} et θ_{WP} changeant as z_{av} variant au fur et à mesure que z_{av} augmente (racines occupant des couches plus profondes avec différentes propriétés), et z_{av} , obtenu en adaptant la fonction sinusoidale proposée par Borg et Grimes (1986) pour la croissance racinaire, basée sur un grand nombre d'observations de terrain contenant 48 espèces de cultures. Ces résultats sur la profondeur des racines ont été comparés aux mesures locales *in situ* (trois par saison, Carrilho, 2019) pour ajuster z_{av} et l'estimation. SWD était généralement estimé ainsi :

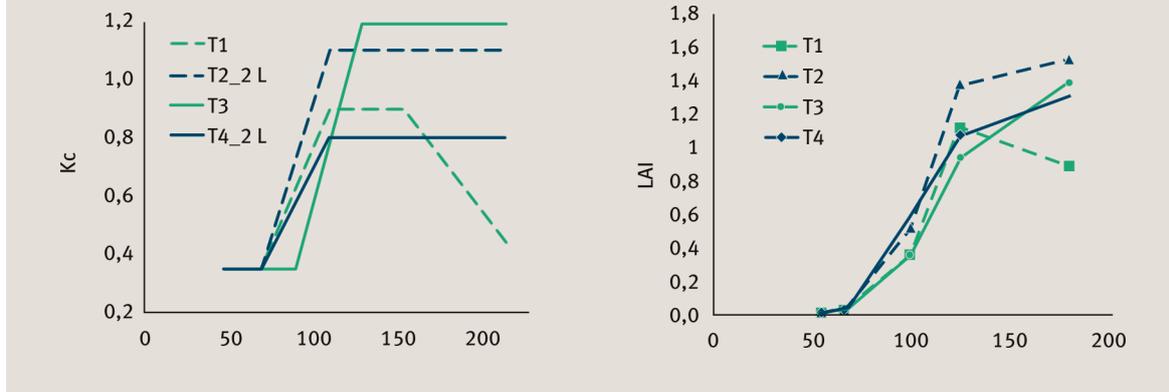
$$SWD = (\theta_{FC} - \theta_{mod}) \times z_{av} \quad [7]$$

Les paramètres du sol θ_{FC} et θ_{WP} ont été obtenus en multipliant les fractions correspondantes de la masse par la densité apparente du sol (D_a), le tout mesuré *in situ*, en quatre couches (de 0 à 50 cm en profondeur) avec quatre répétitions.

2 Progression saisonnière : en haut : de la teneur volumique en eau du sol, mesurée (θ_{meas}) ou modélisée (θ_{mod}), en rapport avec les lignes définissant les valeurs correspondantes : FC, WP et limite inférieure RAW ; et en bas : coefficient de stress estimé comme dans l'équation 5.



③ Progression saisonnière de (a, gauche) K_c obtenue de manière expérimentale à travers un processus d'auto-apprentissage à partir de la modélisation et des mesures de la teneur en eau du sol, et des mesures correspondantes de LAI (b, droite) pour quatre traitements (voir le texte) : ligne simple (T1, T3) et ligne double (T2 et T4), sous des conditions de stress (T3, T4), et en l'absence de stress hydrique (T1 and T2), pour des cultures de poivrons industrielles, Portalegre (Portugal). L'impact du stress à court terme (figure ②b) est exclu de ces valeurs K_c , qui reflètent seulement l'impact du stress sur le développement foliaire sur le long terme.



Pour ce qui est de la seconde approche (B), divers échantillons de θ_{meas} ont été prélevés sur les mêmes quatre couches de sol, en trois points par parcelle (tuyaux goutte-à-goutte, à 20 cm et 40 cm de ceux-ci), et sur quatre parcelles (48 mesures par jour). L'état hydrique du sol était également surveillé par une entité externe au moyen d'une sonde capacitive de mesure ; résultats douteux non présentés.

La stratégie se présente comme suit : en réduisant, dans la mesure du possible, l'incertitude inhérente aux paramètres θ_{FC} , θ_{WP} , Z_{av} et en supposant les valeurs p obtenues comme décrit ci-dessus, K_c (pour chaque stade phénologique examiné) a été fixé comme la variable inconnue, dont les valeurs peuvent être obtenues par expérimentation en comparant les valeurs mesurées et modélisées de l'état hydrique du sol. De plus, afin de clarifier l'interprétation des valeurs de K_c obtenues de cette manière, la tendance saisonnière de LAI a été suivie.

La progression saisonnière de la teneur volumétrique en eau obtenue avec les équations ① à ③ a d'abord été comparée aux valeurs observées à six dates différentes. Les paramètres utilisés au départ (surtout K_c) ont générés de mauvais résultats (non présentés). En conséquence, afin d'améliorer l'adéquation, la courbe d'évolution saisonnière de K_c a été modifiée pour les quatre traitements individuellement, et les sorties donnant les meilleurs résultats ont été analysées, (exemple à la figure ②a, pour le traitement T3), avec les valeurs correspondantes K_s (figure ②b).

La tendance saisonnière de K_c (figure ③a), observée à titre expérimental dans les quatre traitements a été comparée au LAI (figure ③b) mettant en évidence une correspondance relativement bonne, surtout pour les traitements bien irrigués. Les différences majeures par rapport aux valeurs présentées dans Doorenbos et Pruitt (1977) et dans Allen *et al.* (1998) – les deux manuels 24 et 56 de la FAO – portaient sur un cycle végétatif beaucoup plus long et le fait que, en général, K_c ne décroît pas à la fin de la période observée (jusqu'à la dernière récolte commerciale).

Une conclusion méthodologique importante était la possibilité, en recourant à cette approche, d'extraire certains paramètres du modèle sans même avoir à effectuer des mesures de ET_a . Cela a été rendu possible grâce à l'accessibilité du système racinaire. Ainsi l'état hydrique du sol est bien représenté par les mesures effectuées, ce qui n'est pas toujours le cas pour les plantes à racines profondes.

Plantes à racines profondes

Étant donné que l'ancien dispositif expérimental permettait de mesurer directement le K_c , pour les cultures à l'étude, la variable sélectionnée pour ajustement était K_s . Sur oliveraies irriguées au goutte-à-goutte (*Olea europaea* 'Arbequina'), on a pu obtenir des données expérimentales de K_s (fonctions K_s) en lien avec plusieurs indicateurs de stress hydriques (variable indépendante).

Les premiers résultats proviennent de Ferreira do Alentejo (au sud du Portugal), d'un système intensif à forte densité (4,75 x 7 m, 20% de couverture des sols), durant l'été 2011. Ces résultats ont été publiés dans les ouvrages Ferreira *et al.* (2012), Ferreira (2017), Conceição *et al.* (2017a, b, 2018). Une description détaillée des matériels et de la méthodologie est consignée dans ces publications. Dans une expérimentation plus récente (été 2017), ayant eu lieu à Serpa, dans la même région, dans une oliveraie à système super-intensif, un ensemble de données non encore pleinement explorées ont confirmé la fonction de stress établie antérieurement (Lourenço *et al.*, 2020).

Dans les deux cas, les cycles de stress ont été utilisés : il s'agissait, pendant plusieurs semaines des étés 2011 et 2017, de garder sous stress une sous-parcelle, et en même temps de bien irriguer une autre (pour référence). L'effet sur la réduction de la transpiration (flux de sève) et sur plusieurs indicateurs de stress hydrique a été suivi. Ce qui nous intéresse ici, c'est la réduction relative de l'utilisation de l'eau (K_s) comme conséquence à court terme du stress hydrique.

► Dans le contexte actuel, ces exemples sont utilisés pour accentuer la nécessité de vérifier et de modifier les paramètres de la fonction de stress, TAW et p , si l'on suppose que cette forme (équation 6) décrit relativement bien la réalité observée, ce qui n'est pas toujours le cas (Paço *et al.*, 2012).

La méthode d'analyse de cette courte présentation consiste à montrer les paramètres appliqués aux conditions sous analyse et à les comparer avec ceux qui émaneraient des recommandations des manuels. De plus, l'interprétation est appuyée par des études complémentaires sur le fonctionnement des racines pour la première expérimentation, et sur d'autres études également, menées par la même équipe sur une parcelle d'oliviers non-irrigués proche..

L'usage direct de l'approche décrite (plantes à racines peu profondes) s'avère, dans la plupart des cas, inapplicable aux plantes à enracinement profond. Cela s'explique par le fait qu'il n'est pas réaliste de s'appuyer sur l'hypothèse selon laquelle les variations de stock d'eau mesurées dans les couches inaccessibles illustrent l'utilisation de l'eau par les plantes. Dans la présente situation, les mesures à long terme de l'utilisation de l'eau pour les cultures avaient été effectuées en ayant recours à une combinaison de mesures d'eddy covariance et de l'évaporation du sol (pour assurer la fiabilité) associées à la technique de mesure du flux de sève (pour le long terme). L'application prudente de telles techniques dans les terrains de culture d'olives mentionnés dans cet article est complexe mais avait déjà été décrite en détails (par ex. : Conceição *et al.*, 2017 et Tezza *et al.*, 2019).

Durant ces deux cycles (2011 et 2017), au cours desquels une sous-parcelle avait été placée en situation de stress, alors que l'autre était bien irriguée, K_s n'était pas

modélisé mais avait été expérimentalement obtenu, étant le résultat approximatif du rapport entre l'eau utilisée dans les deux sous-parcelles (supposant que K_c est resté inchangé, pour la durée du cycle de stress). Les résultats ont permis d'effectuer la dérivation d'une fonction pour la réduction de la transpiration (Ferreira, 2017, 2020), ce qui fut confirmé dans l'expérimentation de Serpa, plus simple et effectuée à une date postérieure (Lourenço *et al.*, 2020).

Les paramètres de l'équation 6 précisément adaptés aux résultats expérimentaux sont $p = 0,04$ et $TAW = 310$ mm (figure 4).

La différence entre les deux valeurs pour TAW (168 mm et 310 mm, figure 4) suggère que les racines avancent plus en profondeur que ne l'illustrent les tableaux et les premières observations. Inversement, la valeur constatée pour p est assez différente de celle suggérée dans les tableaux. Ce constat s'accorde avec nos observations de la fermeture modérée des stomates à une étape assez précoce du stress hydrique, dans ce cultivar, qui présente des caractéristiques iso-hydriques (Conceição *et al.*, 2017b).

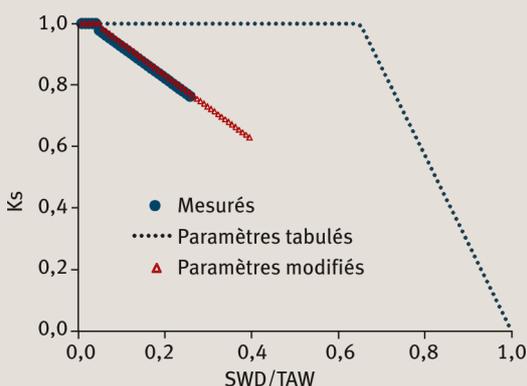
De plus, l'ensemble des résultats de mesures des flux remontant à trois ans ont éclairé les aspects relatifs au volume exploité par les racines :

- pour les oliviers irrigués au goutte-à-goutte, soumis aux pratiques d'irrigation déficitaire de l'exploitant, l'utilisation totale de l'eau pendant la saison d'irrigation était supérieure aux volumes totaux d'irrigation mesurée (Conceição *et al.*, 2017), et cela en dépit de leur jeune âge. Cela pourrait peut-être s'expliquer par le fait que les plantes utilisent un volume important d'eau stockée en hiver et en début de printemps dans des couches relativement profondes.

- un suivi de l'état hydrique du sol à une profondeur atteignant 1,3 m (associé à des études sur la redistribution hydrologique sur terrain pluvial et terrain irrigué) suggère également une exploitation importante de couches profondes du sol (par ex. : Conceição *et al.*, 2018, Ferreira *et al.*, 2018). En outre, et plus important encore, sur ce terrain, l'eau disponible entre la surface et 1,3 m de profondeur n'était pas suffisante pour assurer les flux observés (données non publiées). En conséquence, les mesures des couches supérieures du sol n'ont probablement qu'une valeur indicative (limites des mesures du sol, lorsqu'utilisées seules pour des plantes à racines profondes).

En conséquence, dans cette étude de cas portant sur cultures ligneuses profondes, très résilientes et bien adaptées aux pénuries d'eau de l'été, les approches communes de modélisations pour l' ET_a utilisées seules et sans vérification, peuvent s'avérer inadaptées dans les cas d'application générale de l'irrigation déficitaire (évapotranspiration réduite par le stress). Réciproquement, les mesures du sol seules peuvent également être un échec pour le pilotage de l'irrigation. Dans ce genre de situation, le potentiel en eau foliaire avant l'aube s'est avéré très utile, mais n'est malheureusement pas automatisé (Conceição *et al.*, 2017). Une variable sélectionnée dérivée du diamètre de la tige nécessitait une parcelle bien irriguée en guise de référence, ce qui n'est pas pratiqué (Ferreira *et al.*, 2012).

4 Rapport entre K_s et SWD exprimé sous forme de fraction de TAW . Comparaison entre les valeurs mesurées et modélisées avec les paramètres tabulés (FAO 56 tabulé $p = 0,65$, avec variations pour les taux ET_c , résultat : $0,75$) et $TAW = 138$ mm (dérivé de la profondeur racinaire tabulée, $z = 1,2$ m, pour une couverture des sols de 20 %, et les paramètres des sols, présupposant une courbe complète à l'horizontal). Résultats des modèles également présentés en utilisant les paramètres modifiés expérimentalement : $p = 0,04$ and $TAW = 310$ mm.



Si la modélisation de l'ETa est cruciale pour extraire des paramètres des modèles sans mesures de l'ETa, comme effectué dans l'exemple des plantes à racines peu profondes, cette technique peut être difficile pour les plantes à racines profondes. Un exercice d'essai-erreur pourrait éventuellement apporter des réponses partielles, des approches statistiques (par ex. : Azevedo, 2019) pouvant même être possibles. ■

Remerciements

Les expérimentations mentionnées ont principalement fait l'objet de l'appui des projets WUSSIAAME (PTDC/AACAMB/100635/2008, FCT, Portugal) et WASA (ERANETMED/0006/2014).

Les auteurs

Maria Isabel FERREIRA, Vasco CARRILHO, Nuno CONCEIÇÃO and Sonia LOURENÇO

Physics and Water Resources,
Depart. Sci. Eng. Biosystems (DCEB)
and Research Center Linking Landscape,
Environment, Agriculture and Food (LEAF),
Institut supérieur d'agronomie (ISA),
Université de Lisbonne,
Portugal.

✉ isabelferreira@isa.ulisboa.pt

✉ vasco_carrilho@hotmail.com

✉ nuconceicao@isa.ulisboa.pt

✉ svlourengo@isa.ulisboa.pt

Goncalo LEAL

Direction générale de l'Agriculture
et du Développement rural (DGADR),
Av. Afonso Costa, 3,
1949-002 Lisboa, Portugal

✉ galeal@dgadr.pt

EN SAVOIR PLUS...

- ✉ ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., 1998, Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, Rome: FAO (FAO, *Irrigation and Drainage paper*, 56).
- ✉ AZEVEDO, P., 2018, Aplicações de Big Data e algoritmos de Machine Learning à gestão inteligente da rega Master thesis, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, ✉ <https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/17896>
- ✉ BORG, H., GRIMES, D.W., 1986, Depth development of roots with time: An empirical description, *Trans. ASAE*, n° 29, p. 194-197, ✉ <https://doi.org/10.13031/2013.30125>
- ✉ CARRILHO, V.S., 2019, Determinação experimental do coeficiente cultural em dois sistemas culturais de pimento no Alentejo, Master thesis, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, ✉ <http://hdl.handle.net/10400.5/19522>
- ✉ CONCEIÇÃO, N., HÄUSLER, M., LOURENÇO, S., PACHECO, C.A., TEZZA, L., FERREIRA, M.I., 2017a, Evapotranspiration measured in a traditional rainfed and an irrigated intensive olive orchard during a year of hydrological drought, *Acta Hort.*, n° 1150, p. 281-288, ✉ <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1150.39>
- ✉ CONCEIÇÃO, N., TEZZA, L., HÄUSLER, M., LOURENÇO, S., PACHECO, C.A., FERREIRA, M.I., 2017b, Three years of monitoring evapotranspiration components and crop and stress coefficients in a deficit irrigated intensive olive orchard, *Agric Water Manag.*, n° 191, p. 138-152, ✉ <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.011>
- ✉ CONCEIÇÃO, N., TEZZA, L., LOURENÇO, S., HÄUSLER, M., BOTETA, L., PACHECO, C.A., FERREIRA, M.I., 2018, Importance of very fine roots in deep soil layers for the survival of rainfed olive trees, *Acta Hort.*, 1199, 57, ✉ <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1199.9>
- ✉ DENMEAD AND SHAW, 1962, Availability of Soil Water to Plants as Affected by Soil Moisture Content and Meteorological Conditions, *Agronomy Journal*, n° 54, p. 385-390, ✉ <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050005x>
- ✉ DOORENBOS, J., PRUITT, W.O., 1977, Crop Water Requirements, *FAO Irrigation and Drainage Paper* 24, FAO, Rome, 144 p.
- ✉ FERREIRA, M.I., CONCEIÇÃO, N., PACHECO, C.A., HÄUSLER, M., 2012, Análise de indicadores de desconforto hídrico durante ciclos de stress num olival intensivo no Alentejo. Proceed. VI Simp. Nac. de Olivicultura (Mirandela, November 2012), *Actas Portuguesas de Horticultura*, 21: p. 207-216, ✉ http://aphorticultura.pt/pdf/Indice_Atas_Portuguesas_de_Horticultura-21.pdf
- ✉ FERREIRA, M.I., 2017, Stress coefficients for soil water balance combined with water stress indicators for irrigation scheduling of woody crops, *Horticulturae*, 3 (2), 38, ✉ <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020038>
- ✉ FERREIRA, M.I., GREEN, S., CONCEIÇÃO, N., FERNANDEZ, J.E., 2018, Assessing hydraulic redistribution with the compensated average gradient heat-pulse method on rain-fed olive trees, *Plant Soil*, 425:21, ✉ <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3585-x>
- ✉ FERREIRA, M.I., 2020, Oliveira, a antiga arte de não morrer de fome nem de sede: estudos no Baixo Alentejo, Proceed. VIII Simp. Nac. de Olivicultura, Santarém (June 2018, APH), *Actas Portuguesas de Horticultura*, 31: p. 51-57, ✉ <http://www.rederural.gov.pt/centro-de-recursos/send/14-organizacao-producao/1801-actas-portuguesas-de-horticultura-n-31-viii-simpolio-nacional-de-olivicultura>
- ✉ LOURENÇO, S., CONCEIÇÃO, N., PRIETO LOSADA, H., SILVESTRE, J., SIQUEIRA, J., SANTOS, F., FERREIRA, M.I., 2020, Transpiration reduction as an answer to water stress: model versus measurements for irrigated olive trees in South Portugal, *Acta Hort* (in press).
- ✉ PAÇO, T.A., FERREIRA, M.I., PACHECO, C.A., 2012, Scheduling peach orchard irrigation in water stress conditions: Use of relative transpiration and predawn leaf water potential, *Fruits*, n° 68, p. 147-168.
- ✉ TEZZA, L., HÄUSLER, M., CONCEIÇÃO, N., FERREIRA, M.I., 2019, Measuring and modelling soil evaporation in an irrigated olive orchard to improve water management, *Water* 11(12), 2529, ✉ <https://doi.org/10.3390/w11122529>