



HAL
open science

Efficienc e de l'irrigation à la parcelle. Quelles marges de manœuvre pour des économies d'eau ?

Claire Wittling

► To cite this version:

Claire Wittling. Efficienc e de l'irrigation à la parcelle. Quelles marges de manœuvre pour des économies d'eau ?. Sciences Eaux & Territoires, 2024, 45, pp.8139. 10.20870/revue-set.2024.45.8139 . hal-04811544

HAL Id: hal-04811544

<https://hal.inrae.fr/hal-04811544v1>

Submitted on 29 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0). La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, le numéro de l'article et le DOI.

Efficiences de l'irrigation à la parcelle. Quelles marges de manœuvre pour des économies d'eau ?

Claire WITTLING¹

¹ G-EAU, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, France.

Correspondance : Claire WITTLING, claire.wittling@inrae.fr

Dans le contexte du changement climatique, toutes les régions du monde font simultanément face à une demande alimentaire croissante, une baisse de la disponibilité de l'eau et des utilisations concurrentes de l'eau. L'agriculture est responsable de prélèvements d'eau douce principalement pour l'irrigation : environ 70 % des prélèvements totaux au niveau mondial (FAO, 2015) et 12 % en France (Gleick, 2014). Les économies d'eau en irrigation sont donc devenues un besoin urgent. Cet article propose une synthèse bibliographique des différentes approches envisageables pour réduire la consommation de l'eau à l'échelle de la parcelle.

Économiser l'eau en réduisant les besoins en eau d'irrigation des cultures

Choisir les espèces et variétés cultivées

La consommation en eau des cultures dépend de la position temporelle de leur cycle et de sa durée. Le choix d'espèces à cycle de développement hors des périodes à fortes demandes climatiques réduit les besoins d'irrigation (figure 1). De même, la culture d'espèces physiologiquement tolérantes au stress hydrique, comme le tournesol ou le sorgho, ou d'espèces à capacités élevées d'enracinement et d'extraction de l'eau du sol, comme la vigne ou la luzerne, diminue le risque de pertes de rendement en périodes de forte tension sur la ressource en eau (Leenhardt *et al.*, 2020).

Enfin, les plantes à forte efficacité de rendement ont une capacité physiologique à produire beaucoup de biomasse et un rendement élevé par unité d'eau transpirée. Les oléagineux et légumineuses ont des efficacités de rendement plus faibles que les céréales. Les plantes à métabolisme en C⁴ (maïs, sorgho, canne à sucre...) ont une efficacité de rendement supérieure à celle des plantes en C³ (riz, blé, légumes, arbres fruitiers...).

Choisir ces cultures peut permettre une production par unité d'eau consommée supérieure. Cependant ces cultures, ayant une croissance importante en été, nécessitent des apports d'eau d'irrigation en période de sécheresse.

La diversification et l'allongement des rotations permet d'inclure des espèces moins demandeuses en eau d'irrigation, et donc de réduire les besoins en eau à l'échelle de la rotation culturale.

Mieux valoriser l'eau de pluie pour réduire les besoins en eau d'irrigation

Toutes les actions permettant de mieux valoriser les précipitations d'un territoire par l'agriculture vont limiter le recours à l'irrigation. Citons en particulier, les pratiques visant à augmenter l'infiltration d'eau de pluie (cultures en courbes de niveau, billonnage, couverture du sol), et son stockage dans le sol (apport de matières organiques). Par ailleurs, pour une espèce donnée, la stratégie d'esquive consiste à décaler les stades de développement les plus sensibles au déficit hydrique pour qu'ils ne coïncident plus avec des périodes de sécheresse, mais au contraire avec les périodes de plus grande disponibilité

1. Pour les plantes dites « en C⁴ », la première molécule produite lors de la fixation du CO₂ est un sucre à quatre atomes de carbone (l'oxaloacétate). Alors que pour les plantes dites « en C³ », la première molécule organique produite lors de l'assimilation du CO₂ est une molécule à trois atomes (l'acide phosphoglycérique) (source : Wikipedia).

de l'eau de pluie. Elle permet de réduire les besoins en eau d'irrigation en choisissant des variétés précoces à développement plus rapide et/ou en avançant la date de semis des cultures de printemps dont le cycle de croissance peut se terminer avant les périodes critiques.

Économiser l'eau en réduisant les pertes en eau ou améliorer l'effizienz

Qu'est-ce que l'effizienz de l'eau d'irrigation ?

La définition de l'effizienz de l'irrigation évolue dans le temps, selon les utilisateurs et les échelles considérées (Seckler *et al.*, 2003 ; Jensen, 2007). L'approche historique

a défini l'« effizienz classique » comme le rapport entre l'eau utilisée de manière bénéfique par la culture et l'eau fournie à la parcelle. Dans ce cas, l'eau quittant la parcelle est considérée comme une perte (Hsiao *et al.*, 2007). Plus tard, l'approche « néoclassique » a pris en compte la part d'eau d'irrigation potentiellement disponible pour une réutilisation en aval (Richter *et al.*, 2017), l'eau quittant la parcelle étant réutilisable à l'échelle du bassin versant.

Depuis sa sortie de la station de pompage jusqu'à son utilisation effective par la culture, l'eau d'irrigation franchit plusieurs étapes : transport jusqu'à la parcelle, distribution dans la parcelle, application dans l'air, stockage dans le sol et consommation par la plante (figure 2).

Figure 1 – Positionnement temporel et besoins en irrigation des principales grandes cultures sous les conditions pédoclimatiques de Toulouse, pour un sol de 150 mm de réserve en eau (Leenhardt *et al.*, 2020).

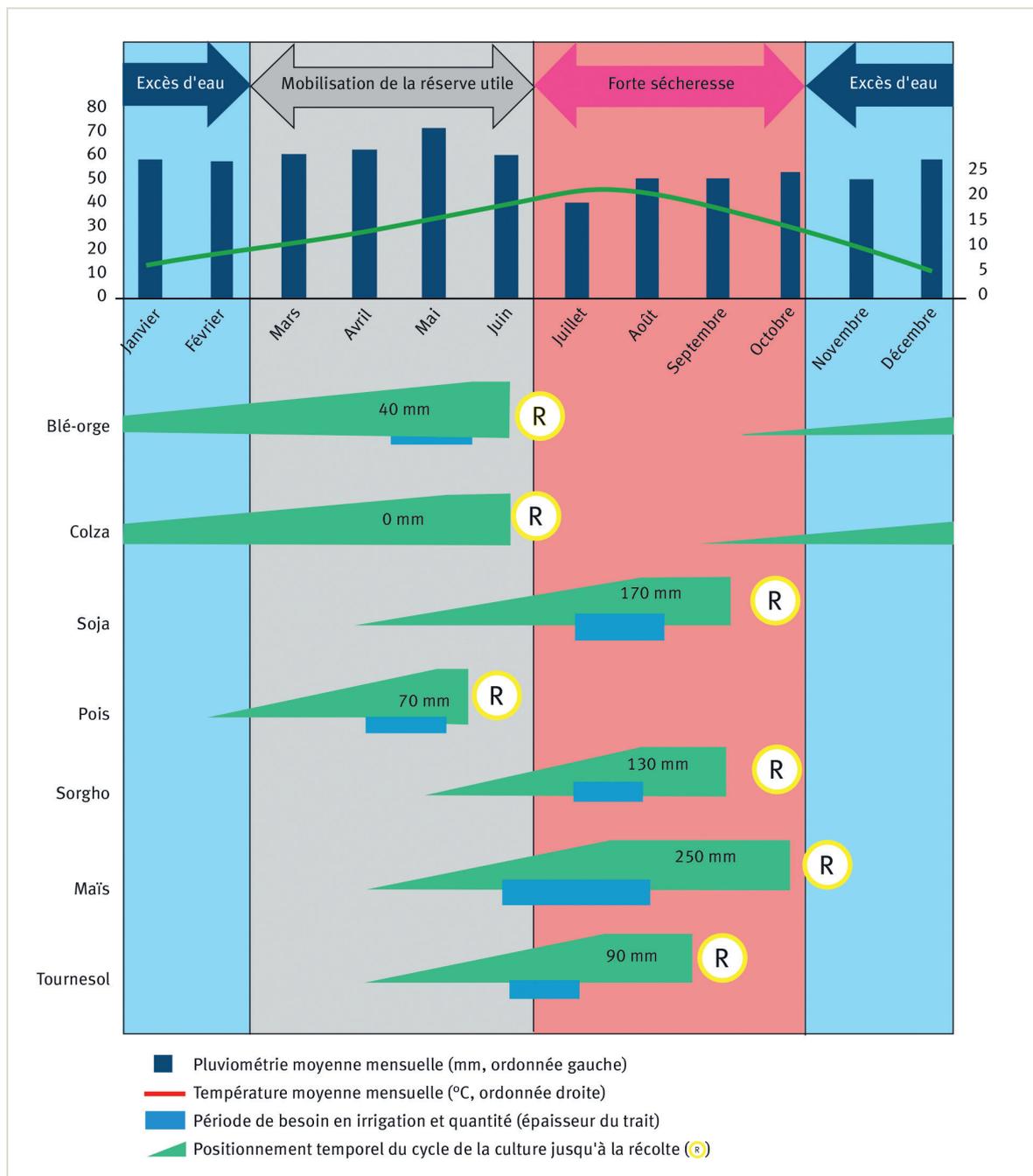
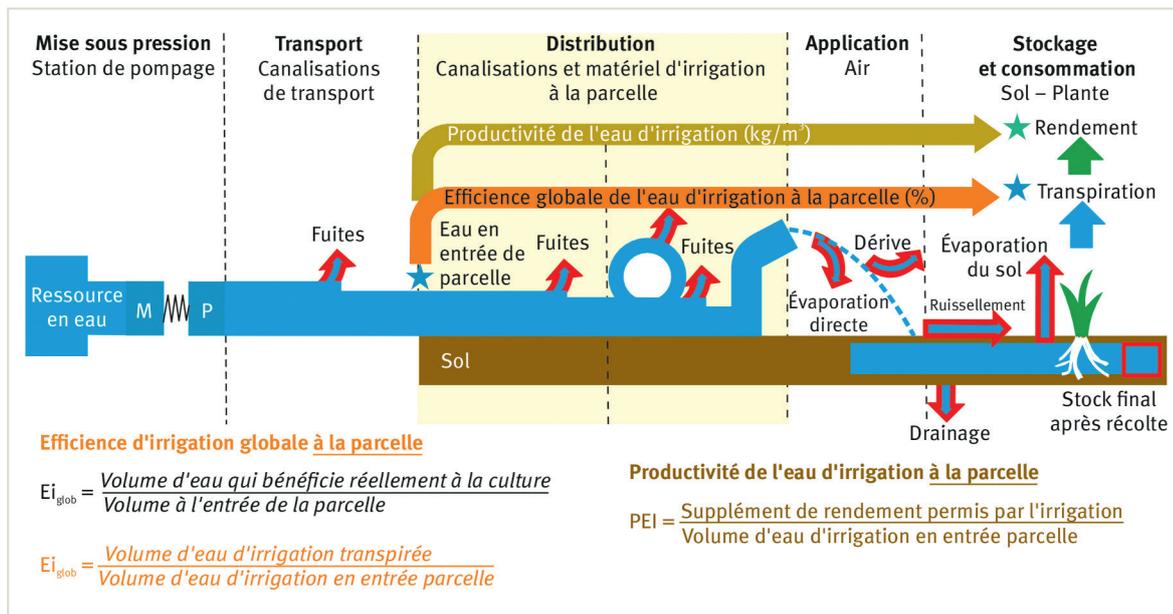


Figure 2 – Cheminement de l'eau d'irrigation et pertes (flèches rouges), dans le cas de l'irrigation par canon-enrouleur avec station de pompage individuelle (M : moteur, P : pompe). Définition de l'effizienz et de la productivité de l'eau.



Diverses pertes peuvent avoir lieu au cours de ce cheminement (flèches rouges). À l'échelle de la parcelle, ces pertes proviennent des fuites dans les canalisations et équipements, de l'évaporation directe dans l'air et de la dérive due au vent en aspersion, du ruissellement et du drainage, de l'eau résiduelle dans le sol après récolte qui représente un stockage excessif d'eau d'irrigation, de la transpiration des mauvaises herbes et enfin de l'évaporation du sol. L'effizienz de l'eau d'irrigation à la parcelle est alors le rapport entre le volume d'eau d'irrigation effectivement transpiré par la culture et le volume d'eau d'irrigation fourni en entrée de parcelle. La productivité de l'eau d'irrigation est le rapport entre le supplément de rendement permis par l'irrigation et le volume d'eau d'irrigation fourni en entrée de parcelle. Économiser l'eau d'irrigation revient à réduire les différentes pertes le long du cheminement de l'eau dans la parcelle, c'est-à-dire à améliorer l'effizienz globale de l'irrigation (voir également Serra-Wittling *et al.*, 2020).

Quels leviers pour réduire les pertes ?

Leviers agronomiques

Les leviers agronomiques sont à actionner en priorité car ils permettent de mieux valoriser l'eau de pluie et ensuite, si l'irrigation s'avère nécessaire, d'économiser de l'eau d'irrigation. Ils agissent sur la taille du réservoir utile (RU) en eau² du sol et son remplissage et concernent principalement la gestion du sol. Citons par exemple les pratiques d'agriculture de conservation des sols (ACS) qui reposent sur (1) un travail du sol simplifié voire nul (semis direct), (2) la couverture permanente du sol, et (3) des rotations culturales longues et diversifiées. Dans un agrosystème stabilisé, conduit depuis plusieurs années en ACS, la capacité de rétention en eau du sol dans les horizons de surface est accrue par la forte teneur en matière organique et par une plus forte porosité, ce qui permet de diminuer les pertes par drainage. Les

pertes par ruissellement sont réduites car l'infiltration de l'eau est favorisée par une meilleure structure (stabilité des agrégats), une continuité dans la macroporosité (biopores) et une augmentation de la durée d'infiltration de l'eau (rugosité de surface due aux résidus de culture ou aux couverts végétaux). L'amélioration de la dynamique de fonctionnement du réservoir utile du sol en ACS (infiltration plus importante et plus stable dans le temps) ainsi que sa meilleure utilisation par les cultures (profondeur d'enracinement supérieure) semble jouer un rôle plus important que l'augmentation du RU proprement dit (Alletto *et al.*, 2022). Enfin, les pertes par évaporation du sol sont limitées en raison de l'effet protecteur du couvert végétal mort ou vivant (effet mulch). Selon Raza *et al.* (2011), la pratique de non-labour améliore le stockage d'eau dans le sol de 8 à 33 %, et donc l'effizienz globale de 17 à 30 %. Le mulch à la surface du sol réduit le ruissellement de 10 à 75 % et l'évaporation de 11 à 36 %, ce qui représente une augmentation de l'effizienz globale de 10 à 45 %.

Leviers technologiques

Ils concernent les équipements d'irrigation proprement dits, ainsi que la manière de les utiliser.

Adopter un système d'application plus effizienz

Un système d'irrigation effizienz permet de réduire les pertes. Ainsi, des économies d'eau sont réalisées en passant de l'irrigation gravitaire ou de l'aspersion à l'irrigation localisée. L'irrigation localisée élimine les pertes par dérive et évaporation directe de l'aspersion. Du fait des doses appliquées plus faibles et des débits plus bas, elle réduit également le ruissellement et le drainage. Le goutte à goutte enterré réduit considérablement l'évaporation de l'eau d'irrigation du sol (Bonachela *et al.*, 2001). Les valeurs moyennes d'effizienz à la parcelle couramment adoptées sont 55-75 % pour l'enrouleur, 60-85 % pour la couverture intégrale, 75-90 % pour les

2. Le réservoir utile en eau d'un sol (RU) représente la quantité d'eau maximale que le sol peut contenir et restituer aux racines pour la vie végétale (source : GIS SOL).

pivots traditionnels, 70-95 % pour les micro-asperseurs et le goutte à goutte de surface, et 75-95 % pour le goutte à goutte enterré (Howell, 2003).

Optimiser l'uniformité de distribution

Une faible uniformité de distribution de l'eau peut être due à un mauvais dimensionnement de l'installation entraînant des écarts de débit, à une variation des conditions hydrauliques de fonctionnement, aux conditions ventées (Weber et Granier, 2012), au colmatage. Une bonne uniformité contribue à une plus grande efficacité car elle évite les zones sur-irriguées et donc les pertes par ruissellement/drainage. Par exemple, en couverture intégrale, Carrión *et al.* (2014) montrent expérimentalement une efficacité plus élevée en quadrillage de 15 m x 15 m qu'en 18 m x 18 m en raison d'une meilleure uniformité avec l'espacement rapproché.

Améliorer un système existant

Une autre façon de tirer parti de la technologie consiste à ajouter certains dispositifs à un système existant. Sur canons enrouleurs, les systèmes de brise-jet ou d'angle réglable évitent les pertes en eau par débordement hors de la parcelle ciblée (routes ou parcelles voisines). Sur pivots, un système d'irrigation à débit variable (VRI) peut permettre des économies d'eau de l'ordre de

15 % (Ghinassi et Pezzola, 2014; Zhao *et al.*, 2017) en évitant les zones sur-irriguées et donc les pertes par ruissellement/drainage.

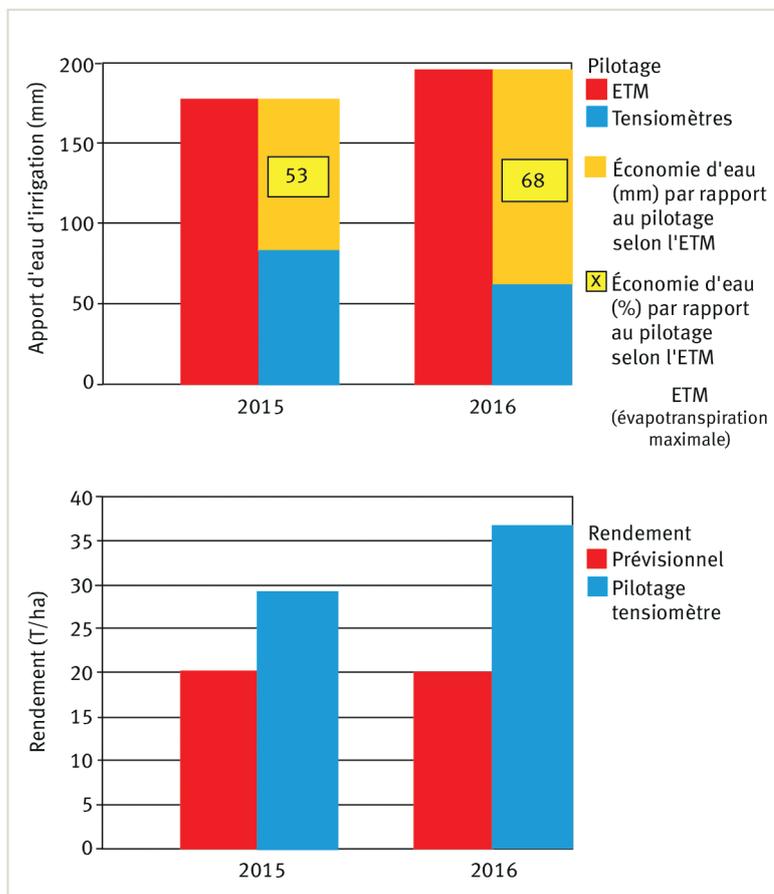
Optimiser l'utilisation du matériel

Les problèmes d'étanchéité ou de fuites dans les tuyaux d'amenée d'eau au sein de la parcelle ou dans les équipements eux-mêmes (tuyau d'un enrouleur), provenant de la vétusté du matériel et de son mauvais entretien, sont susceptibles d'entraîner jusqu'à 10% de pertes. Supprimer les fuites permet naturellement d'économiser de l'eau. De même, choisir les heures d'application de l'eau permet de réduire les pertes par évaporation directe en aspersion qui représentent, en règle générale, moins de 5 % de l'eau appliquée lors d'une journée chaude (Molle *et al.*, 2011). On recommande d'éviter d'irriguer en aspersion durant la plage horaire 11-15 h, heure à laquelle la température et le rayonnement sont les plus élevés. Enfin, pour limiter les pertes par dérive, l'aspersion est déconseillée en journées fortement ventées, de même que durant la plage horaire 12-18 h (vent thermique).

Leviers de pilotage de l'irrigation

Le pilotage de l'irrigation consiste à ajuster la fréquence et les doses d'irrigation en fonction d'une stratégie d'irrigation optimisée par des modèles ou en fonction des conditions climatiques combinées au statut hydrique mesuré de la plante ou du sol. Les capteurs utilisés pour suivre l'état hydrique des plantes (dendromètres, capteurs de flux de sève...) ou du sol (sondes capacitatives, tensiomètres) permettent d'éviter la sur-irrigation et donc de réduire les pertes par ruissellement, drainage et/ou eau résiduelle dans le sol après la récolte. Les solutions digitales pour le pilotage de l'irrigation (drone, images satellite, stations agro-météo connectées) permettraient des économies d'eau de 15 à 20% par rapport à une irrigation traditionnelle (DATI project, 2021). La figure 3 présente les consommations en eau d'irrigation pour la culture de la courgette de plein champ, avec irrigation en goutte à goutte de surface pilotée soit selon l'évapotranspiration maximale (ETM), soit à l'aide de tensiomètres. L'économie d'eau réalisée grâce aux tensiomètres est de 53 à 68% par rapport au pilotage à l'ETM, avec des rendements nettement supérieurs aux rendements prévisionnels (Gard *et al.*, 2016).

Figure 3 – Apports d'eau d'irrigation et rendements de courgettes de plein champ. Irrigation au goutte à goutte de surface. Pilotage selon l'évapotranspiration maximale (ETM) ou à l'aide de tensiomètres (seuil de déclenchement 25 cbars dans l'horizon 0-15 cm). Le rendement prévisionnel est l'objectif de production choisi et utilisé pour le calcul des doses de fertilisants. Serra-Wittling et Molle (2017), d'après Gard *et al.* (2016).



Quelles marges de manœuvre pour des économies d'eau ?

Leviers agronomiques

Même si de nombreux travaux illustrent l'impact de la gestion du sol sur ses propriétés en lien avec l'eau, trop peu de références existent sur leurs conséquences sur l'irrigation et les économies d'eau. Sur cultures maraîchères en ACS en Uruguay, ayant observé une augmentation du réservoir utile du sol de 9,5 % et une diminution du drainage de 37 %, Alliaume *et al.* (2017) modélisent une économie d'eau d'irrigation potentielle allant de 27 à 44 %. Cependant, dans la pratique, il est généralement observé que les exploitants en ACS irriguent de la même manière qu'en conventionnel, sans tirer avantage de l'évolution des propriétés de leur sol en ACS. Des recherches complémentaires sont donc encore nécessaires.

Tableau ① – Économies d'eau potentiellement réalisables par un changement de matériel d'irrigation.

Maïs et autres grandes cultures					
Économie d'eau (%)	Nouveau				
Ancien	Enrouleur	Couverture intégrale	Pivot basse pression	Goutte-à-goutte de surface	Goutte-à-goutte enterré
Enrouleur	10	10	5-20*	10-20*	15-35*
Couverture intégrale	–	10	5-20*	15-25*	20-25*
Pivot/rampe	–	–	5-10*	5-15	10-25
Goutte-à-goutte de surface	–	–	–	10-20	15-20
Goutte-à-goutte enterré	–	–	–	–	10-20

Arboriculture					
Économie d'eau (%)	Nouveau				
Ancien	Aspersion sur frondaison	Aspersion sous frondaison classique	Aspersion sur frondaison/microjet	Goutte-à-goutte de surface	Goutte-à-goutte enterré
Aspersion sur frondaison	10	10	15-30*	20-35	25-35*
Aspersion sous frondaison/microjet	–	–	10-20	15-25	15-30
Goutte-à-goutte de surface	–	–	–	10-20	5-15
Goutte-à-goutte enterré	–	–	–	–	10-20

Maraîchage de plein champ			
Économie d'eau (%)	Nouveau		
Ancien	Couverture intégrale	Mini-aspersion	Goutte-à-goutte de surface
Couverture intégrale	10	5-10*	5-15*
Mini-aspersion	–	10-20	10-30
Goutte-à-goutte de surface	–	–	10-20

* Augmenter les valeurs hautes et basses des intervalles de + 5 en région ventée.

Leviers technologiques

Un référentiel (tableau ①) a été établi pour évaluer a priori les économies d'eau potentiellement réalisables en changeant de système d'irrigation, en se basant sur des références d'économies d'eau réalisées à la parcelle avec les divers systèmes d'irrigation sous pression (Serra-Wittling et Molle, 2017). Les références collectées couvrent une période de trente ans, sur un large éventail de cultures et de conditions pédoclimatiques du territoire métropolitain français. Les consommations d'eau ont été comparées entre deux systèmes d'irrigation différents (aspersion ou système localisé) dans le même contexte (même année, même sol, même culture). Dans ce tableau, les valeurs sur la diagonale concernent le renouvellement d'un système à l'identique, c'est-à-dire le remplacement d'un ancien système par un nouveau.

Leviers de pilotage de l'irrigation

De la même manière, un référentiel des économies d'eau réalisables par l'adoption de sondes de sol (sondes capacitatives ou tensiomètres) ou de plante (dendromètre) a été établi (tableau ②) à partir de consommations d'eau observées entre deux modes de pilotage (sans et avec sondes d'état hydrique du sol ou de la plante) dans le même contexte.

Tableau ② – Économies d'eau potentiellement réalisables par l'acquisition et l'utilisation d'un matériel de pilotage (en comparaison d'une irrigation sans matériel de pilotage).

Tensiomètres ou sondes capacitatives	Tensiomètres + dendromètres
Grandes cultures	
15-40	–
Arboriculture	
10-20	15-30
Maraîchage de plein champ	
15-40	–

Ces deux référentiels d'économies d'eau potentiellement réalisables, soit par un changement de système d'irrigation, soit par l'adoption de sondes de sol ou de plante pour le pilotage de l'irrigation, peuvent être utilisés pour évaluer ex ante les économies d'eau que l'on peut attendre lors de la modernisation d'installations d'irrigation. Ils peuvent également aider les politiques publiques à évaluer la réduction potentielle des prélèvements d'eau pour l'irrigation à l'échelle de la région ou du bassin. En

outre, ils peuvent fournir des informations aux institutions de financement et aux organismes de réglementation, comme l'Union européenne, afin d'orienter les subventions vers les équipements les plus pertinents en termes de potentiel d'économie d'eau.

Ce qu'il faut retenir

Réaliser des économies d'eau en irrigation passe par la réduction des pertes en eau, c'est-à-dire par l'amélioration de l'efficience de l'irrigation à la parcelle.

Améliorer l'efficience à la parcelle se fait d'abord par les pratiques culturales, en particulier la gestion du sol, qui permet de mieux valoriser l'eau de pluie (et d'irrigation si nécessaire). Cependant, très peu de références sont encore disponibles sur les économies d'eau réalisables à travers ces pratiques.

Améliorer l'efficience se fait ensuite par la modernisation des systèmes d'irrigation : changement de système et pilotage de l'irrigation. De nombreux progrès technologiques ont été réalisés pour concevoir des systèmes d'application de l'eau économes ; toutefois le potentiel d'économies d'eau est faible en années très sèches. Les outils de pilotage de l'irrigation sont relativement peu utilisés et de grandes marges de progrès existent encore ; de plus, ces outils permettent des économies d'eau élevées même en années sèches (Serra-Wittling *et al.*, 2020).

Afin de favoriser les économies d'eau en contexte de changement climatique, il est important d'inciter les investissements de matériels économes en eau, mais aussi les améliorations de pratiques d'irrigation dont le pilotage de l'irrigation. ■

RÉFÉRENCES

- Alletto, L., Cueff, S., Bréchemier, J., Lachaussee, M., Derrouch, D., Page, A., Gleizes, B., Perrin, P., & Bustillo, V. (2022). Physical properties of soils under conservation agriculture : A multi-site experiment on five soil types in south-western France. *Geoderma*, 428, 116228. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116228>
- Alletto, L., Cueff, S., Bréchemier, J., Lachaussee, M., Derrouch, D., Page, A., Gleizes, B., Perrin, P., & Bustillo, V. (2022). Physical properties of soils under conservation agriculture : A multi-site experiment on five soil types in south-western France. *Geoderma*, 428, 116228. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116228>
- Alliaume, F., Rossing, W., Tittonell, P., & Dogliotti, S. (2017). Modelling soil tillage and mulching effects on soil water dynamics in raised-bed vegetable rotations. *European Journal Of Agronomy*, 82, 268-281. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.08.011>
- Bonachela, S., Orgaz, F., Villalobos, F. J., & Fereres, E. (2001). Soil evaporation from drip-irrigated olive orchards. *Irrigation Science*, 20(2), 65-71. <https://doi.org/10.1007/s002710000030>
- Carrión, F., Montero, J., Tarjuelo, J., & Moreno, M. (2014). Design of Sprinkler Irrigation Subunit of Minimum Cost with Proper Operation. Application at Corn Crop in Spain. *Water Resources Management*, 28(14), 5073-5089. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0793-x>
- DATI project, PRIMA, (2021). <https://datiproject.eu/>
- FAO (2015). *FAO Statistical Pocket Book. World, food and agriculture*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9a8e88e3-5814-49c9-b350-1d68a745ca6a/content>
- Gard, B., Goillon, C., Pierre, P. & Raynal, C. (2016). Culture de la courgette en zone vulnérable nitrate : outils de pilotage et stratégie de fertilisation. *Infos CTIFL*, 32, 47-56.
- Ghinassi, G., Pezzola, E. (2014, 13-16 juin). *Controlling sprinkler rotation speed to optimize water distribution uniformity of travelling rain guns*. [Conférence]. ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting, Montreal, Quebec Canada.
- Gleick, P. H. (2014). *The World's Water. The Biennial Report on Freshwater Resources*. Volume 8. Island Press Washington, DC. <https://doi.org/10.5822/978-1-61091-483-3>
- Howell, T.A. (2003). Irrigation Efficiency. Dans B. A. Stewart & T. A. Howell (dirs.), *Encyclopedia of Water Science* (pp. 467-472). Marcel Dekker, New York.
- Hsiao, T. C., Steduto, P., & Fereres, E. (2007). A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation Science*, 25(3), 209-231. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0063-2>
- Jensen, M. E. (2007). Beyond irrigation efficiency. *Irrigation Science*, 25(3), 233-245. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0060-5>
- Leenhardt, D., Voltz, M., & Barreteau, O. (2020). *L'eau en milieu agricole : Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale*. Éditions Quæ, Versailles. <http://books.openedition.org/quæ/372151>
- Molle, B., Tomas, S., Hendawi, M., & Granier, J. (2011). Evaporation and wind drift losses during sprinkler irrigation influenced by droplet size distribution. *Irrigation and drainage*, 61(2), 240-250. <https://doi.org/10.1002/ird.648>
- Raza, A., Friedel, J. K., & Bodner, G. (2011). Improving Water Use Efficiency for Sustainable Agriculture. Dans E. Lichtfouse (Eds.), *Agroecology and Strategies for Climate Change. Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 167-211). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1905-7_8
- Richter, B., Brown, J. D., DiBenedetto, R., Gorsky, A., Keenan, E., Madray, C., Morris, M. C., Rowell, D. A., & Ryu, S. (2017). Opportunities for saving and reallocating agricultural water to alleviate water scarcity. *Water Policy*, 19(5), 886-907. <https://doi.org/10.2166/wp.2017.143>
- Seckler, D., Molden, D., & Sakthivadivel, R. (2003). The concept of efficiency in water-resources management and policy. Dans J. W. Kijne, R. Baker & D. Molden (Eds), *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement* (pp. 37-51). CABI Publishing eBooks. <https://doi.org/10.1079/9780851996691.0037>
- Serra-Wittling, C., & Molle, B. (2017). *Évaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation. Rapport d'étude réalisée avec le soutien du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation*. IRSTEA. 149 p. <https://hal.inrae.fr/hal-02608073>
- Serra-Wittling, C., Molle, B., & Cheviron, B. (2020). Modernization of irrigation systems in France : what potential water savings at plot level? *Sciences Eaux & Territoires*, (34bis), 46-53. <https://doi.org/10.14758/set-revue.2020.4.09>
- Weber, J.J., & Granier J. (2012). Irrigation. Optimiser l'efficience de l'eau du transport à l'application. *Perspectives Agricoles*, 387, 38-41.
- Zhao, W., Li, J., Yang, R., & Li, Y. (2017). Yields and water-saving effects of crops as affected by variable rate irrigation management based on soil water spatial variation (in Chinese, with English abstract). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33, 1-7.