

Efficiency and optimization of irrigation : the Optirrig model

Optirrig est un outil logiciel de génération, d'analyse et d'optimisation de scénarios d'irrigation qui a été développé par INRAE. Il s'appuie sur une description simplifiée de la croissance des plantes en fonction de l'évolution des ressources en eau et en azote du sol. Il permet de comparer les mérites de différentes stratégies d'irrigation en fonction de différentes contraintes (quota d'eau, périodes de disponibilité limitée, arrêtés préfectoraux, coût de l'eau et de l'énergie), pour des objectifs opérationnels à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation ou du territoire.

Le modèle Optirrig

Le modèle Optirrig (Cheviron *et al.*, 2016) est une structure informatique à deux couches, dont la couche interne est héritée du modèle Pilote (Mailhol *et al.*, 2018) en suivant le même principe de parcimonie quant au nombre et à la nature des variables pertinentes, et aux liens entre elles. Cependant, cette boucle hydro-agronomique a été récemment réécrite en langage R et sous forme modulaire, de manière à permettre un développement collaboratif, simplifier l'analyse du modèle et l'inclusion de nouveaux processus, avec par exemple la création d'un module efficacité. La couche externe consiste en une série de « modes scénarios » qui ont en commun l'utilisation de runs multiples, pour des scénarios exploratoires (tests de pratiques d'irrigation et de fertilisation, scénarios climatiques), de l'analyse numérique (étude d'incertitude et de sensibilité) ou de l'optimisation de l'irrigation (optimisation ex-post jusqu'ici, optimisation en temps quasi-réel dans les projets actuels).

La figure 1 détaille la boucle hydro-agronomique (figure 1a), comment le signal d'irrigation se propage à travers les variables du modèle (figure 1b) puis où s'effectuent les calculs dédiés à l'efficacité de l'irrigation (figure 1c) et enfin comment les différents scénarios d'irrigation sont gérés dans les « modes scénarios » pour évaluer leurs impacts sur les indicateurs d'efficacité (figure 1d). Le modèle tourne à un pas de temps journalier mais ses variables saisonnières (ex. : indice de récolte H_i , rendement agricole Y) ainsi que les valeurs finales des variables journalières associées (ex. : matière sèche totale TDM) peuvent être anticipées, à condition d'être assez avancé dans la saison. Cette anticipation vaut aussi pour les autres indicateurs saisonniers (ex. : irrigation cumulée, rendement financier), elle permet un contrôle des tentatives d'optimisation en liant l'horizon opérationnel (effets à court court-terme) et l'horizon tactique (effets sur la saison).

Dans une vue d'ensemble, les paramètres-clés de la boucle hydro-agronomique sont la capacité au champ et la profondeur du profil (i.e., la détermination correcte de la réserve utile) et la variable centrale est l'indice foliaire LAI. De bonnes prédictions de la dynamique du LAI, à partir des paramètres « phénologiques » de temps thermiques associés aux stades de développement de la culture, assurent généralement des prédictions fiables de la dynamique des autres variables. Il faut noter que le stress hydrique affectant LAI est calculé comme un déficit relatif d'évapotranspiration tandis que le stress hydrique affectant TDM est calculé comme un déficit relatif de transpiration, avec la possibilité d'ajuster indépendamment la nocivité des stress (paramètre λ associé aux stress, figure 1a). Ceci est un degré de liberté intéressant dans la paramétrisation du modèle, pour contrôler séparément l'amplitude des termes LAI et TDM une fois leurs dynamiques connues.

Efficacité de l'irrigation

« Du canal aux feuilles de la plante »

L'eau d'irrigation va de la source (canal, rivière, nappe phréatique ou réservoir) jusqu'aux racines et aux feuilles des plantes, à travers une succession de processus et d'échelles :

- écoulement sous pression lors du pompage et de l'amenée d'eau à la parcelle, avec des pertes régulières (fuites, fonctionnement normal des canons) ou singulières (rupture de canalisations, endommagement des gaines d'irrigation) ;
- écoulement multiphasique dans l'air, avec (i) atomisation d'une petite fraction massique du jet lors de l'aspersion, et transport hors périmètre de cette fraction plus sensible au vent qu'à la gravité, et (ii) déformation du périmètre mouillé (région impactée par les gouttes liquides) causée par le vent avec dépassement des limites de la parcelle ;

- possible flaquage lors d'irrigation trop intenses, en particulier durant la phase d'humectation des sols, avec un risque de ruissellement, de pertes accrues par évaporation ou de drainage profond ;
- écoulement de surface lent lors de l'irrigation gravitaire, avec les pertes ci-dessus plus une distribution d'eau inégale selon la position amont ou aval dans la parcelle ;
- écoulement dans la matrice du sol ou dans ses macropores lors de l'infiltration, avec un risque de stockage excessif par rapport aux capacités d'absorption d'eau par les racines de la plante ;
- reprise de l'eau du sol par les racines et écoulement de l'eau dans les organes de la plante, causé par des différences de pression successives, résultant finalement en changement de phase (évaporation par les feuilles).

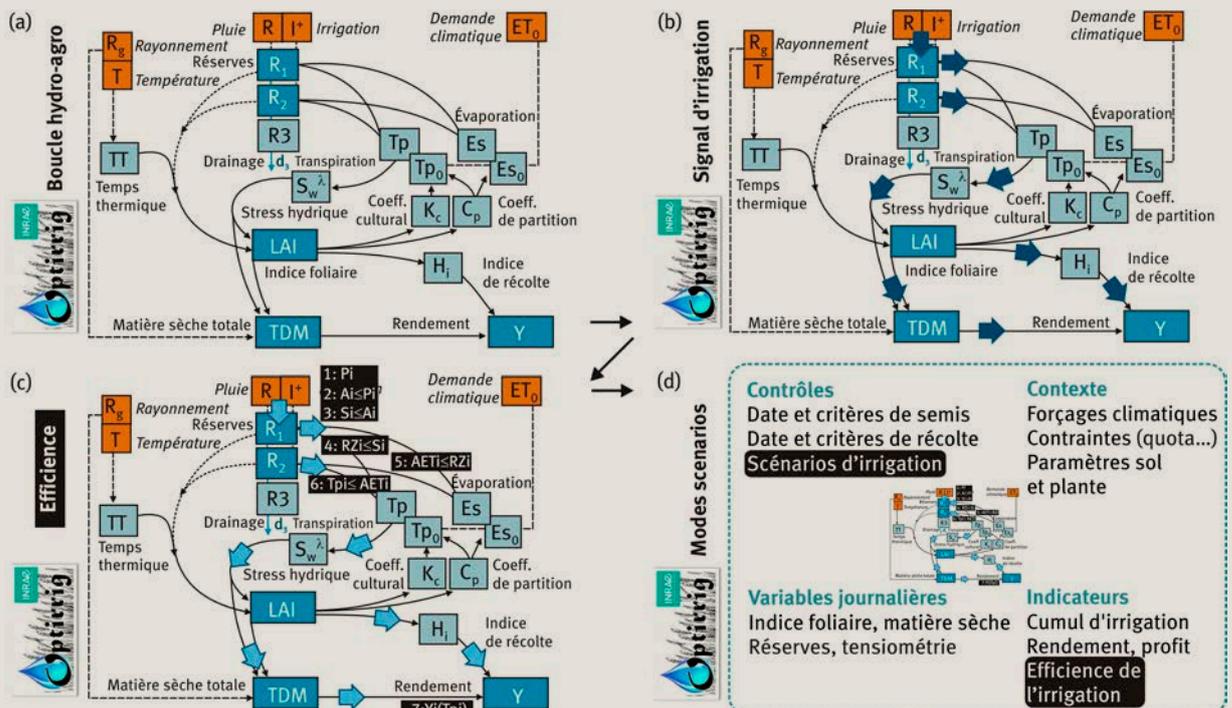
Même si elle ne couvre pas complètement le sujet, l'expression « du canal aux feuilles des plantes » renvoie à la succession d'échelles spatiales, de technologies de l'irrigation et de processus physiques traversés par l'eau d'irrigation. L'équipe OPTIMISTE (Optimisation du pilotage et des technologies de l'irrigation, minimisation des intrants, transferts dans l'environnement) de l'unité mixte de recherche G-EAU (INRAE Montpellier) travaille sur la connaissance détaillée des processus physiques en jeu et sur leur mesure, pour la constitution d'une banque de données mais aussi pour en tirer des formulations simplifiées, identifier les processus d'ordre 1 à implémenter dans Optirrig.

Schéma en cascade

La figure 2 illustre cette cascade de processus et les pertes associées, en les rattachant à des éléments présents dans le modèle, soit des variables calculées explicitement, soit des effets décrits indirectement à travers des coefficients (ici, la dérive due au vent et la compétition avec les adventices). Comme cela apparaissait déjà dans la figure 1c, séparer le terme d'irrigation en plusieurs termes (P_i : irrigation amenée à la parcelle, A_i : irrigation qui traverse les équipements et S_i : irrigation qui atteint le sol) permet une analyse fine des « processus amont » (que le module efficience permet d'étendre plus amont, jusqu'au pompage de l'eau).

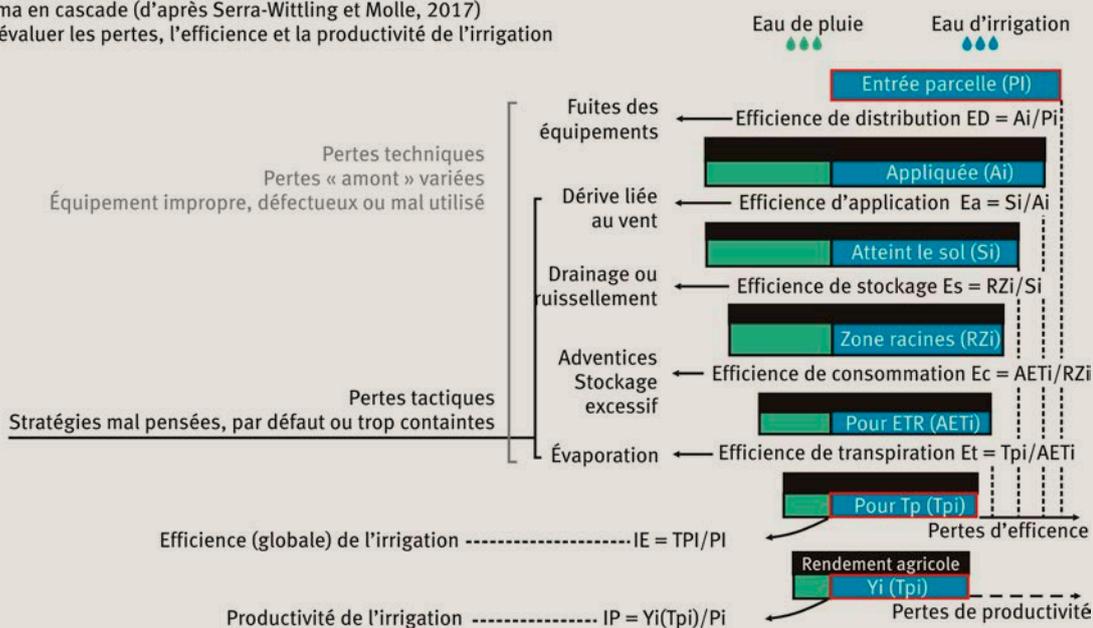
Le point le plus marquant de la figure 2 est sans doute la partition « artificielle » entre les fractions d'eau de pluie et d'eau d'irrigation (adaptée de Serra-Wittling et Molle, 2017). Cette partition est propagée de manière très visuelle à travers les différents processus, avec des pertes successives et spécifiques, jusqu'à parfois réduire la partie utile de l'irrigation à une petite partie de l'eau d'irrigation disponible en entrée de la parcelle. Il en va de même pour la partie utile de l'eau de pluie, mais l'irrigation est délibérée, alors que la pluie ne l'est pas. L'optimisation appliquée à la fraction « eau d'irrigation » devrait donc dépendre du remplissage de la réserve du sol par la pluie, ce qui implique (i) d'identifier l'évolution des fractions d'eau de pluie et d'eau d'irrigation dans la réserve du sol (figure 1c) et (ii) chercher dans la figure 2 les bonnes variables-cibles pour l'optimisation de l'irrigation.

1 (a) Forçages climatiques (orange), variables principales et observables (bleu moyen) et variables auxiliaires (bleu clair) dans la boucle hydro-agronomique. (b) Transmission du « signal d'irrigation » à travers les variables du modèle. (c) Focus sur l'efficience de l'irrigation avec l'ajout de variables dédiées : P_i l'eau d'irrigation amenée à la parcelle, A_i l'irrigation appliquée à travers les équipements, S_i l'irrigation qui atteint le sol, RZi l'irrigation stockée dans la zone racinaire, $AETi$ l'irrigation évapotranspirée, TPi l'irrigation transpirée, $Yi(Tpi)$ la fraction du rendement agricole directement attribuable à l'irrigation, voir les détails dans le schéma en cascade de la figure 2. (d) Modes scénarios d'Optirrig pour des runs multiples de la boucle hydro-agronomique, pour des contextes et/ou des contrôles sélectionnés, en testant ici des scénarios d'irrigation et leurs impacts attendus sur les variables journalières du modèle et les indicateurs saisonniers, et en se focalisant sur l'efficience de l'irrigation en plus des variables cibles habituelles pour l'optimisation.



❷ Schéma en cascade pour lister et évaluer les pertes successives (techniques et/ou tactiques) durant l'irrigation à la parcelle. Les efficacités des différents processus se combinent pour donner une efficacité globale qui représente la fraction de l'eau d'irrigation amenée à la parcelle (Pi) qui est finalement transpirée par la culture (Tpi). Le lien entre efficacité et productivité de l'irrigation est également représenté.

Schéma en cascade (d'après Serra-Wittling et Molle, 2017)
pour évaluer les pertes, l'efficacité et la productivité de l'irrigation



Bien sûr, une difficulté pour l'optimisation est la nature imprévisible du climat sur un horizon de quelques jours, et encore plus sur l'horizon de la saison. L'optimisation de l'irrigation en temps quasi-réel est donc bien plus compliquée que l'optimisation ex-post, une fois que la chronique et les valeurs finales de toutes les variables sont connues, et que des stratégies d'irrigation améliorées peuvent être recherchées sans incidence directe sur la saison en cours. Cependant, même si le schéma en cascade a été imaginé pour évaluer l'efficacité de stratégies passées, il convient aussi pour décrire la dynamique de ses différents termes. En prenant toutes les quantités mentionnées comme des variables journalières, on peut aussi évaluer les effets à court terme des tentatives d'optimisation en temps quasi-réel orientées vers plus d'efficacité.

Dans les problèmes d'optimisation de l'irrigation, les pertes techniques émanent de l'équipement et les pertes tactiques d'une stratégie défectueuse. Les pertes techniques et les parades associées ont été décrites dans Serra-Wittling et Molle (2017) et Serra-Wittling *et al.* (2019). Cet article traite plutôt des actions tactiques, en lien avec de récents développements d'Optirrig.

Le schéma en cascade permet de visualiser les pertes successives (et comment elles s'additionnent étape par étape pour constituer des pertes globales) ou d'identifier les efficacités des différents processus, étape par étape. Ces efficacités E (E_d pour la distribution, E_a pour l'application, E_s pour le stockage, E_c pour la consommation, E_t pour la transpiration) prennent des valeurs entre 0 et 1, et de même que l'efficacité globale obtenue par multipli-

cation. Cette autre lecture du schéma en cascade s'avère utile pour déterminer le maillon faible de la chaîne d'efficacité. En guise d'exemple, quand toutes les efficacités valent $E=0,9$ (ce qui est vraiment élevé) le score total n'est « que » $IE=0,95=0,69$ et quand toutes les efficacités valent $E=0,75$ (ce qui est assez mauvais pour E_d et E_a mais bon pour les autres termes) le score total chute à $IE=0,24$. Cette lecture du schéma en cascade incite à (i) estimer les valeurs contextuelles de E_d , E_a , E_s , E_c et E_t , pour un *a priori* sur les points faibles de la chaîne d'efficacité, (ii) concevoir une expérimentation pour confirmer le diagnostic, (iii) établir des cibles réalistes (en termes d'efficacité) compte-tenu des contraintes de gestion du site et des objectifs, et (iv) traiter le problème d'optimisation, soit à la main, par des essais et erreurs, soit dans des procédures plus formelles.

La manière de traiter les problèmes d'optimisation dépend certainement des variables prises en compte et des interactions entre elles. Par exemple, la présence de termes communs (P_i , T_{pi}) dans les expressions de l'efficacité de l'irrigation IE et de sa productivité IP suggère une corrélation claire entre IE et IP . De plus, le rendement financier leur est probablement corrélé aussi, car « plus de plante avec moins de gouttes » ne peut pas nuire. Finalement, on parvient à cadrer un peu le problème d'optimisation grâce aux relations entre ses variables-clefs (le cumul d'irrigation ΣI , le rendement agricole Y et le rendement financier F) et en se choisissant un angle d'attaque : réduire les pertes (i.e. augmenter les efficacités des processus) dans le schéma en cascade.

Implémentation dans Optirrig

Hypothèses et vérifications

Jusqu'à la figure 1c la figure 2 ont insisté sur la distinction entre les fractions d'eau de pluie et d'eau d'irrigation dans plusieurs des variables du modèle (réserves du sol, drainage, évaporation, transpiration). L'hypothèse de départ, celle qui sous-tend toute l'approche, est celle d'un mélange total entre l'eau de pluie et l'eau d'irrigation dans les réservoirs du sol, et donc dans les organes de la plante. Par conséquent, les quantités propagées dans les variables du modèle sont des fractions volumiques « fictives » (ou « effectives ») d'eau de pluie et d'eau d'irrigation.

D'après des travaux de référence en physique du sol sur les processus de diffusion, tournées vers l'adaptation de la loi de Fick (Crank, 1956; Carslaw et Jaeger, 1959; Kirkham et Powers, 1972) et d'après les relations entre la diffusivité et la teneur en eau (ex.: Millington et Quirk, 1961), il est très probable que le mélange complet se produise entre l'eau de pluie et l'eau d'irrigation, au pas de temps journalier du modèle, pour la taille typique de ses réservoirs et pour leurs teneurs en eau habituelles. En particulier, l'irrigation vise justement à ne pas atteindre des teneurs en eau trop faibles qui seraient des cas-limites pour cette approche, et auraient simplement pour effet de retarder le mélange, non de l'empêcher. De plus, l'existence de flux gravitaires de convection, soit explicites (drainage entre les réservoirs d'Optirrig) soit implicites (mouvements d'eau à l'intérieur de chaque réservoir), est très favorable au mélange (ex.: Flüher et al., 1996; Chalhoub et al., 2013).

Le mélange complet signifie qu'il n'y a pas de stratification entre l'eau de pluie et l'eau d'irrigation dans le sol, sans différences de densité ou de rhéologie (hautement improbables pour de l'irrigation en eau conventionnelle)

et que l'ordre d'arrivée dans le sol ne joue aucun rôle. Ceci écarte les écoulements de type « effet-piston » et suppose aussi que le mélange se fasse avant que le drainage ne survienne.

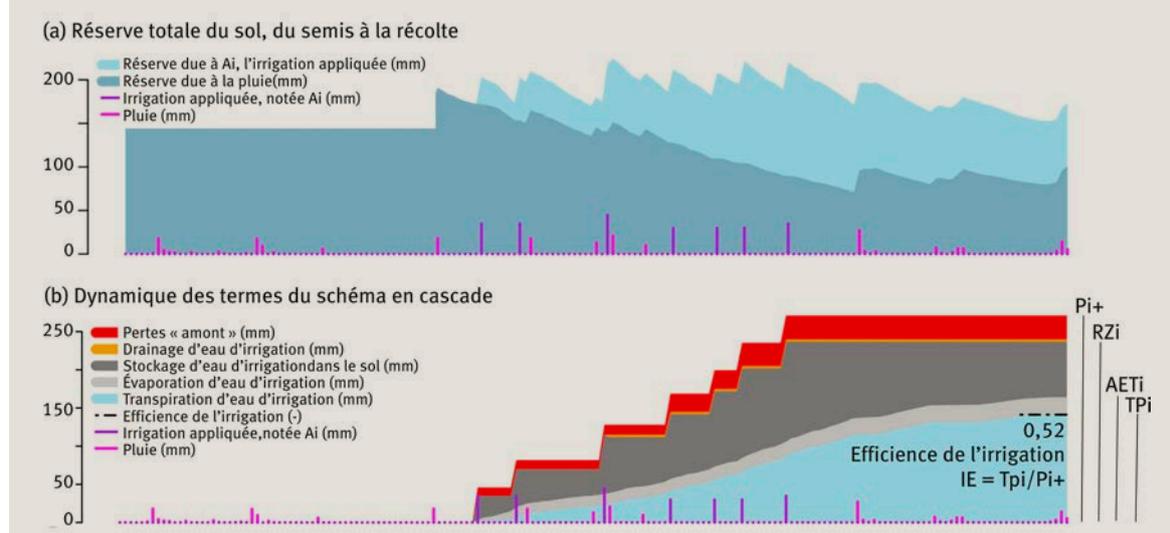
Les hypothèses « mélange complet » et « pas de stratification » dans les réservoirs du sol (R1, R2, R3, figure 1) permettent de définir des fractions volumiques (f_1, f_2, f_3) pour chaque réservoir, avec par exemple $f_1 = R_{11}/R_1$ où R_{11} est la réserve d'eau d'irrigation et R_1 la réserve totale, avec des définitions similaires pour f_2 et f_3 . Par cohérence, nous supposons que tous les processus physiques (drainage, évaporation, prélèvement par les racines) mobilisent les mêmes fractions volumiques. Par exemple, si TP_{21} est la transpiration d'eau d'irrigation depuis le réservoir R2, alors $TP_{21}/TP_2 = f_2$.

Codage des hypothèses dans Optirrig

L'effort de codage est d'abord de formuler toute la série de nouvelles variables liées à l'efficacité comme un module d'Optirrig, à brancher sur la boucle hydro-agronomique, sans en modifier les calculs. Ensuite, il faut forcer la règle des « fractions égales » pour toutes les variables reliées à l'efficacité, pour préserver la conservation de la masse, ce qui nécessite des astuces de programmation à présenter ailleurs, avec les détails de la structure du modèle.

Une fois qu'il est possible d'avoir les fractions I-irrigation et R-pluie pour toutes les variables, toutes les quantités du schéma en cascade (figure 2) deviennent accessibles au pas de temps journalier, pour évaluer l'efficacité des processus. Il est possible, par exemple, d'identifier que la pluie de 50 mm tombée le 4 avril a rempli les réservoirs R1 et R2 pour donner des proportions de 90 % d'eau de pluie et de 10 % d'eau d'irrigation, et provoqué un drainage de 10 mm, composé de 90 % d'eau de pluie (9 mm) et de 10 % d'eau d'irrigation (1 mm).

5 (a) Dynamique de la réserve totale du profil de sol, depuis le semis jusqu'à la récolte, en séparant la fraction due à l'irrigation (bleu clair) de la fraction due à la pluie (bleu moyen) pour les épisodes d'irrigation (violet) et de pluie (rose) indiqués. (b) Dynamique associée des termes du schéma en cascade de l'efficacité (figure 2) indiquant l'efficacité globale de l'irrigation ainsi que les valeurs des termes de perte : amont de la parcelle, drainage, stockage excessif et évaporation. Ce graphique provient d'un exemple semi-fictif construit sur des données réelles de sol et de culture (maïs, sur la station expérimentale de Lavalette, à Montpellier, France) avec des données de pluie et d'irrigation modifiées.



Sorties du modèle

La figure 3a montre les évolutions de la réserve du sol due à l'irrigation (bleu clair) et à la pluie (bleu moyen) en réponse à l'irrigation (violet) et à la pluie (rose), dans un cas d'école (cas réel légèrement modifié). Au premier coup d'œil, la stratégie d'irrigation suivie vise à maintenir une réserve totale suffisamment haute, sur le profil du sol, ce qui est très classique. Un autre élément bien visible est la fraction croissante d'eau d'irrigation, apporter pour compenser (surcompenser ?) le manque de pluie durant les mois chauds.

La figure 3b donne des indications complémentaires et propose une vue d'ensemble de la dynamique des variables de l'efficience, en montrant leurs valeurs cumulées. Des pertes « amont » sous forme d'incidents matériels ont été supposés survenir durant les 1^{re}, 4^e et 7^e irrigations, en décrivant par « amont » ce qui se trouve avant le terme Si dans le schéma en cascade (ce qui permet d'étendre l'analyse aux termes de pompage, de transport et de livraison de l'eau à la parcelle). Ces pertes (en rouge, figure 3b) sont des pertes affectant l'eau disponible initialement à la parcelle (Pi) voire plus en amont (Pi+).

Dans cet exemple, du drainage d'eau d'irrigation (orange, figure 3b) se produit après l'épisode de pluie qui survient juste après la 3^e irrigation. Par contraste, une grande quantité d'eau d'irrigation (gris moyen, figure 3b) est progressivement stockée dans le sol, qui culmine après la 7^e irrigation puis décroît progressivement jusqu'à une valeur finale probablement excessive. Il n'était sans doute pas nécessaire d'effectuer les deux dernières irrigations de la saison culturale. Néanmoins, l'évaporation de l'eau d'irrigation (gris clair, figure 3b) reste limitée et son ratio à la transpiration d'eau d'irrigation (bleu

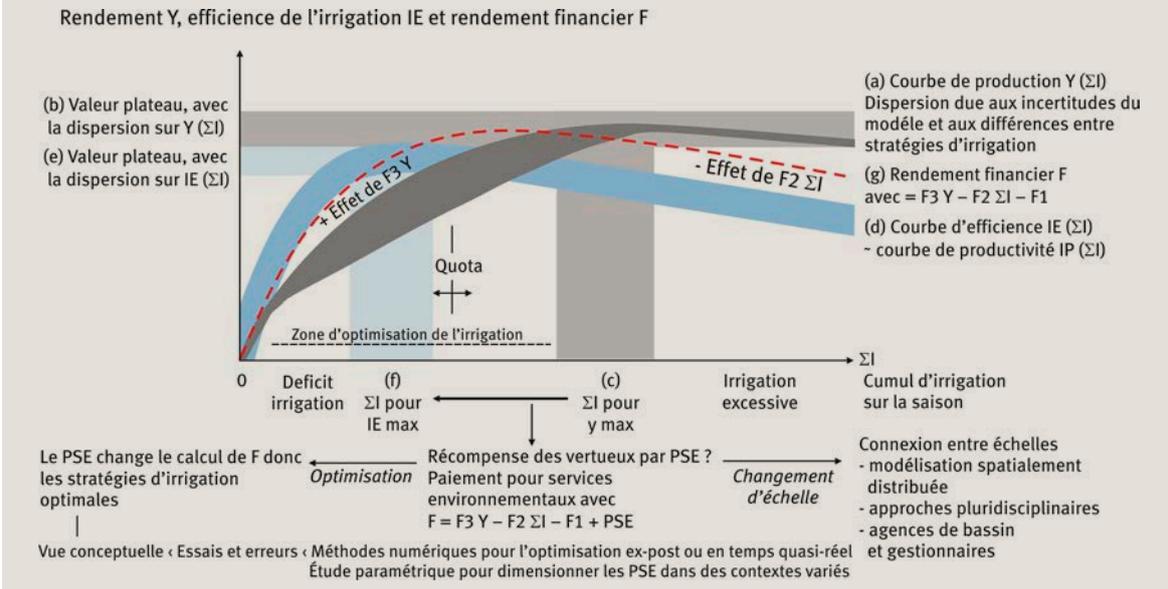
clair, figure 3b) décroît avec le temps, ce qui est satisfaisant. Finalement, une valeur correcte de l'efficience de l'irrigation est atteinte (IE = 0,52) et les valeurs des variables liées à l'irrigation, dans le schéma en cascade, sont reportées dans la partie droite de la figure 3b, pour identifier les pertes.

L'efficience de l'irrigation dans les problèmes d'optimisation

Un problème typique d'optimisation est de trouver les scénarios qui maximisent le rendement financier (disons F) avec suffisamment de rendement agricole (Y > Y*) mais moins d'irrigation qu'un certain quota (ΣI < ΣI*), et avec des contraintes additionnelles sur la formulation des scénarios d'irrigation (ex. : tour d'eau et limitations techniques, disponibilité limitée des ressources sur certaines périodes, décrets préfectoraux). Il y a une interaction claire entre ces variables, liées par la courbe de production Y(ΣI) et l'écriture du rendement financier F = F3 Y(ΣI) - F2 ΣI - F1 où F3 est le prix de vente de la récolte, F2 donne les coûts de l'eau et de l'énergie par volume d'irrigation et F1 rassemble les coûts fixes. Les limitations attendues pour la disponibilité de la ressource (quotas d'irrigation sur la saison, décrets préfectoraux pour restreindre les prélèvements) incitent à la recherche d'alternatives durables et si possibles vertueuses, par exemple l'inclusion de l'efficience de l'irrigation parmi les cibles de l'optimisation, avec des récompenses dédiées. La figure 4 tente d'illustrer ceci, à lire pas à pas en suivant les notes (a) à (g).

La figure 4a montre l'enveloppe des courbes de production avec (i) les inévitables incertitudes de modélisation dans la relation entre ΣI et Y (biais de modélisation, processus ignorés ou mal décrits, calage sur des don-

4 Essai d'illustration du lien entre le rendement agricole Y (a, b, c), l'efficience globale de l'irrigation IE (d, e, f) et le rendement financier F (g) pour différents cumuls d'irrigation ΣI. Les scénarios d'optimisation de l'irrigation peuvent modifier le lien entre Y, IE et F, et s'avérer particulièrement pertinents pour les conditions d'irrigation déficitaire, d'autant plus en présence de quotas d'irrigation ou de disponibilité limitée des ressources pendant certaines périodes. On ajoute un peu de complexité et un degré de liberté supplémentaire en considérant le paiement pour services environnementaux comme une rétribution possible pour les stratégies d'irrigation vertueuses ou/et parcimonieuses.



nées incertaines) et (ii) des différences importantes entre stratégies d'irrigation (règles de décision plus ou moins pertinentes) donc entre scénarios d'irrigation (chroniques et cumulés d'irrigation). Ces éléments favorisent la dispersion de la courbe de production, en particulier dans les conditions d'irrigation déficitaires propices à l'optimisation (ventre de la courbe). *A contrario*, toutes les stratégies tendent à converger quand très peu d'eau est disponible ou si beaucoup trop d'irrigation est appliquée, avec un rendement affecté par les conditions d'anoxie du sol. La dispersion de la courbe de production s'accompagne d'un maximum flou pour le rendement Y , et d'une valeur plateau mal déterminée, figure 4b. La valeur de ΣI qui correspondrait au maximum de Y ne peut pas non plus être déterminée de manière unique, figure 4c.

Comme évoqué précédemment, une forte corrélation existe entre la productivité de l'irrigation (IP) et son efficience (IE). Les formes des courbes de IE, figure 4d, et de IP (non représentée) sont donc supposés être similaires, avec comme caractéristique connue le fait que la productivité maximum de l'irrigation soit obtenue pour des niveaux d'irrigation bien inférieurs à ceux nécessaires pour obtenir le rendement maximum. En traduisant ceci en termes d'efficience, les figures 4e et 4f indiquent la valeur maximale de IE et la valeur de ΣI associée, avec leurs incertitudes.

En gardant la description aussi simple que possible, le rendement financier F en figure 4g augmente fortement avec Y (étant donné les prix relativement bas de l'eau et de l'énergie) puis atteint un maximum, avant de décroître quand Y sature, alors que ΣI continue d'augmenter et que l'eau est visiblement gaspillée. Une manière de changer la donne serait l'introduction de l'efficience de l'irrigation parmi les variables de l'optimisation, et la récompense des stratégies vertueuses, d'irrigation déficitaire, qui réaliseraient un bon score d'efficience. Le paiement pour services environnementaux (PSE) offre un levier d'action et pourrait être introduit comme un terme additionnel dans le calcul de F . Ceci aurait deux implications majeures : les scénarios optimaux d'irrigation ne seraient

certainement pas les mêmes à l'échelle de la parcelle, et le passage à l'échelle du bassin s'avèrerait nécessaire, avec une vision pluridisciplinaire (simulations multi-agents, économie, politiques de l'eau) et spatialement distribuée pour cartographier les pratiques (téléédétection), les ressources (hydrologie, hydrogéologie), et éventuellement le rétrocontrôle entre les prélèvements pour l'irrigation et la disponibilité des ressources. ■

Les auteurs

Bruno CHEVIRON, Claire SERRA-WITTLING, Juan David DOMINGUEZ BOHORQUEZ, Bruno MOLLE, Madiop LO et Yassin ELAMRI
G-EAU, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, 361 Rue Jean-François Breton, BP 5095, F-34196 Montpellier Cedex 5, France.

✉ bruno.cheviron@inrae.fr
✉ claire.serra-wittling@inrae.fr
✉ juan-david.dominguez-bohorquez@inrae.fr
✉ bruno.molle@inrae.fr
✉ madiop.lo@inrae.fr
✉ yassin.elamri@inrae.fr

Magalie DELMAS^{1,2}

1. G-EAU, INRAE, AgroParisTech, Cirad, IRD, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, 361 Rue Jean-François Breton, BP 5095, F-34196 Montpellier Cedex 5, France.

2. Université de Montpellier, L'institut Agro, UMR G-Eau, F-34060 Montpellier, France.

✉ magalie.delmas@supagro.fr

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Jean-Claude Mailhol et les collègues de l'équipe OPTIMISTE pour les précédentes versions du modèle et la collection de données, ainsi que le groupe de développement d'Optirrig. Merci à Yves Coquet (AgroParisTech) et Rafaël Angulo-Jaramillo (ENTPE) pour les éclairages et discussions sur la partie physique du sol de cet article.

EN SAVOIR PLUS...

- ✉ **CARSLAW, H.S., JAEGER, J.C.**, 1959, *Conduction of heat in solids*, Oxford, Clarendon Press, 517 p.
- ✉ **CHALHOUB, M., COQUET, Y., VACHIER, P.**, 2013, Water and Bromide dynamics in a soil amended with different urban composts, *Vadose Zone Journal*, 12 (1), p. 1-11, ✉ <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00853615>
- ✉ **CHEVIRON, B., VERVOORT, R. W., ALBASHA, R., DAIRON, R., LE PRIOL, C., MAILHOL, J.-C.**, 2016, A framework to use crop models for multi-objective constrained optimization of irrigation strategies, *Environmental Modelling & Software*, vol. 86, p. 145-157, ✉ <https://hal.inrae.fr/hal-02604719/>
- ✉ **CRANK, J.**, 1956, *The mathematics of diffusion*, London, Oxford University Press, 347 p.
- ✉ **FLÜHLER, H., DURNER, W., FLURY, M.**, 1996, Lateral solute mixing processes – A key for understanding field-scale transport of water and solutes, *Geoderma*, vol. 70, p. 165-183, ✉ [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)00079-8](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00079-8)
- ✉ **KIRKHAM, D., POWERS, W.L.**, 1972, *Advanced soil physics*, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, New-York, 552 p.
- ✉ **MAILHOL, J.-C., ALBASHA, R., CHEVIRON, B., LOPEZ, J.-M., RUELLE, P., DEJEAN, C.**, 2018, The PILOTE-N model for improving water and nitrogen management practices: Application in a Mediterranean context, *Agricultural Water Management*, vol. 204, p.162-179, ✉ <https://hal.inrae.fr/hal-02607450>
- ✉ **MILLINGTON, R.J., QUIRK, J.P.**, 1961, Transport in porous media [in Soil Science], *Transactions of the International Congress of Soil Science*, 7 (1), p. 97-106.
- ✉ **SERRA-WITTLING, C., MOLLE, B.**, 2017, *Évaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation*, Rapport pour le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 150 p., ✉ <https://bit.ly/3jIWD2Y>
- ✉ **SERRA-WITTLING, C., MOLLE, B., CHEVIRON, B.**, 2019, Plot level assessment of irrigation water savings due to the shift from sprinkler to localized irrigation systems or to the use of soil hydric status probes. Application in the French context, *Agricultural Water Management*, 223, ✉ <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.017>