

Évaluation des pertes par évaporation lors des irrigations par aspersion en condition de fort déficit hydrique

Pierre Ruelle^a, Jean-Claude Mailhol^a et Bernard Itier^b

Que se passe-t-il lors de l'irrigation par aspersion d'une culture en conditions sèches, c'est-à-dire à forte demande évaporative ? Cette question toute simple met toutefois en jeu des phénomènes complexes dont les conséquences sont très variables selon les situations agroclimatiques locales, particulièrement lorsqu'il s'agit d'évaluer les pertes d'eau. En s'appuyant sur une analyse bibliographique, les auteurs nous rappellent ici un certain nombre de notions de base et commentent des exemples d'évaluation des pertes d'eau.

Les conditions climatiques particulièrement sèches rencontrées en 2003 conduisent à s'interroger de manière plus pressante sur les meilleures conditions dans lesquelles peuvent se dérouler les irrigations par aspersion et en particulier sur les horaires à utiliser pour disposer d'une efficacité maximale des apports d'eau aux cultures et limiter les pertes.

Le plus souvent, même dans les publications présentées dans les revues scientifiques reconnues, un seul des aspects est abordé : les pertes lors des irrigations, ou au contraire le fonctionnement hydrique des cultures, ou encore les échanges sol-culture-atmosphère. En nous appuyant sur une analyse bibliographique ciblée, nous rappelons ici un certain nombre de notions de base bien connues concernant ces différents points et nous les illustrerons par des exemples sur des situations standards, en se limitant au cas où les cultures sont bien développées et aux périodes où les besoins en eau sont maximum.

Il s'agira donc de tenter de répondre aux questions suivantes :

- pourquoi et quelle quantité d'eau est évaporée par une culture ou une formation végétale en conditions « normales » ?
- quelles évaluations des pertes lors des irrigations trouve-t-on dans la littérature ?
- comment cela se passe-t-il pour une culture irriguée en conditions sèches, c'est-à-dire à forte demande évaporative ?

Les exemples choisis s'appliquent au département de la Charente. Nous accompagnerons nos réponses par un exemple de calcul de l'évaporation additionnelle par saturation de l'air, puis nous concluons en apportant quelques recommandations.

Fonctionnement hydrique d'une culture, production de biomasse et évapotranspiration

Pour toute plante dans un milieu cultivé ou une formation naturelle, la photosynthèse ne peut s'effectuer au niveau des feuilles qu'avec le maintien des stomates des feuilles dans une situation ouverte. Cette ouverture des stomates est indispensable pour l'absorption du CO₂ et la production de biomasse ; en contrepartie, de la vapeur d'eau est évaporée, ce qui permet une régulation de la température du couvert végétal. Si la plante manque d'eau, elle ferme progressivement ses stomates, en réduisant sa production, finit par passer en conditions de vie ralentie et meurt.

La quantité d'eau évaporée au niveau d'un couvert végétal correspond à la transpiration, il faut lui ajouter l'évaporation directe du sol ; l'ensemble constitue l'évapotranspiration ET. En l'absence de stress hydrique, l'évapotranspiration ET est égale à l'évapotranspiration maximale ETM.

Les contacts

^a Cemagref,
UR Irrigation, BP 5095,
34196 Montpellier
Cedex 5

^b INRA, 2 place Viala,
34060 Montpellier
Cedex 1

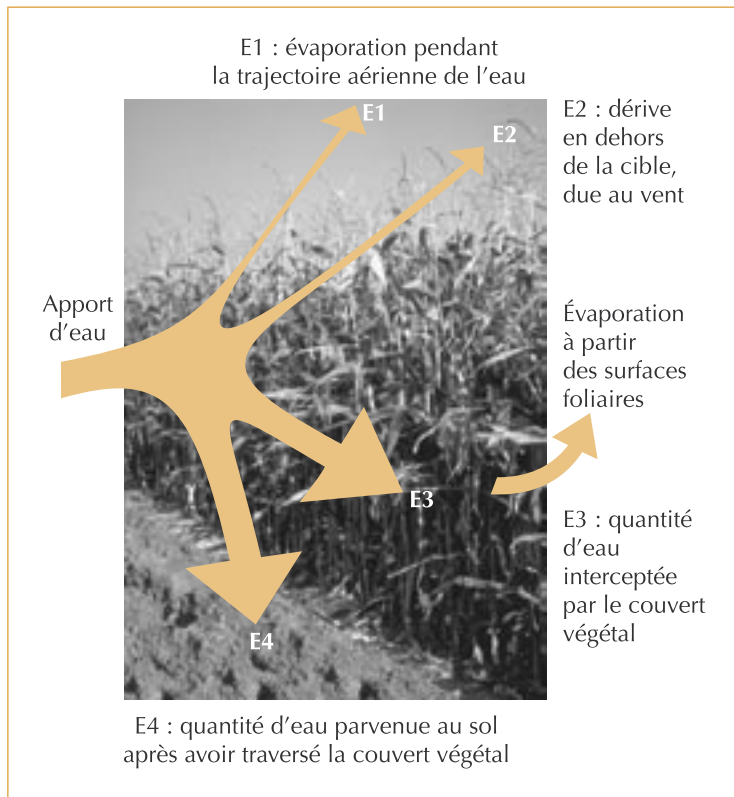
La valeur de l'ETM dépend à la fois du développement de la culture et de la demande climatique caractérisée par une évapotranspiration de référence ET_{ref} , encore très souvent appelée évapotranspiration potentielle ETP, qui peut être évaluée à partir des mesures disponibles sur une station agrométéorologique.

Deux types de valeur sont fournis par Météo-France : ET_{ref} *Penman Monteith* au pas journalier et ET_{ref} *Penman* au pas décadaire, selon les références admises au plan international. Elles sont fondées sur le bilan énergétique au-dessus d'un couvert végétal, l'énergie disponible étant utilisée pour évaporer l'eau qui transite à travers le couvert. La plupart des modèles de cultures utilisent le concept de coefficient cultural pour estimer la consommation maximale de la plante à partir de l'évapotranspiration de référence (Doorembos et Pruitts, 1975 ; Itier, 1994 ; Mailhol *et al.*, 1997).

Classiquement on a :

$$ETM = kc \text{ E}_{tref} \quad (1)$$

▼ Figure 1 – Principe du fractionnement d'un apport d'eau d'irrigation par aspersion.



Pour une culture avec un fort développement végétatif, comme le maïs en été, la valeur habituellement retenue est :

$$kc = 1,15 \quad (2)$$

À titre d'exemple, ET_{ref} déterminée pour Angoulême en 2003 entre le 15 juin et le 15 septembre a une valeur moyenne de 5,5. Les valeurs journalières s'étalent entre 3,5 mm et 7,7 mm, ce qui nous donne des ETM pouvant atteindre 9 mm environ comme valeur extrême selon (1).

Lorsque le couvert est bien développé (culture couvrante), l'évaporation directe du sol est négligeable. C'est la situation qu'on rencontre pendant la période estivale, que nous prendrons seule en considération par simplification.

Le devenir de l'eau et les pertes lors des irrigations

Pendant une irrigation, l'eau sortant d'un dispositif d'irrigation par aspersion se divise en plusieurs parties (figure 1) :

- une quantité $E1$ s'évapore pendant son trajet entre la buse et le couvert végétal ;
- $E2$ peut être transportée par le vent hors de la zone arrosée ;
- $E3$ est interceptée par le couvert ;
- $E4$ pénètre dans le couvert et arrive au sol.

Une partie de la lame d'eau $E3$ s'écoule le long des tiges et rejoint le sol, l'autre s'évapore directement à la surface des feuilles et contribue à réduire la transpiration de la culture ; cette lame d'eau ne peut donc être considérée comme une perte.

La lame d'eau $E2$ est effectivement perdue si elle est transportée hors de la parcelle irriguée, comme le font remarquer plusieurs auteurs. Dans le cas contraire, si elle contribue seulement à arroser une autre partie du champ, elle ne peut être considérée comme une perte à l'échelle du champ. Il convient cependant de remarquer que la valeur de $E2$ est directement liée à la vitesse du vent et que les irrigations sont déconseillées par vents forts car il en résulte de fortes hétérogénéités d'apports avec des conséquences défavorables pour l'environnement par sur-irrigation de certaines zones et sous-irrigation d'autres.

Beaucoup d'études ne distinguent pas E1 et E2, en se limitant à de simples mesures de bilan des quantités d'eau arrivant dans les dispositifs d'irrigation et quantités d'eau mesurées dans des pluviomètres au sol ou juste au niveau du couvert végétal.

Un certain nombre de résultats assez différents sont rapportés dans la littérature :

– Frost et Schwalen (1955) citent des pertes atteignant 55 %, dans des conditions arides de l'Arizona, mais ces valeurs concernent un asperseur isolé et ne peuvent être représentatives d'une couverture intégrale où fonctionnent simultanément un ensemble d'asperseurs. Seginer (1966), en comparant un système d'apport près du sol et un système d'aspersion trouve que la consommation en eau est accrue de 10 % dans le second cas pour une culture irriguée tous les trois jours, mais ne met pas en évidence de différence significative pour des irrigations espacées de quinze jours. Spurgeon *et al.* (1983) indiquent des pertes voisines de 30 % dans des conditions chaudes, sèches et ventées, tandis que Steiner *et al.* (1983) estiment les pertes moyennes à environ 15 % pour des conditions évaporatives élevées ;

– Hermsmeier (1973), en mesurant E2 sur de courtes durées, indique des valeurs variant de 0 à 50 % en Californie, les pertes par évaporation de jour sont trois à quatre fois celles enregistrées lors d'irrigation de nuit. Par contre, il note qu'il est important de prendre en compte la dose apportée et la demande évaporative. Les valeurs les plus élevées rapportées par McLean *et al.* (2000) sont de 8 % environ et concernent un canon ;

– Kincaid et Longley (1973) établissent que les pertes par évaporation sont habituellement inférieures à 2-3 %, même dans des conditions de température de l'air élevé et de faible humidité relative ;

– en Espagne, près d'Albacete, Ortega *et al.* (2002) et Tarjuelo *et al.* (2000) ont mesuré des pertes allant de 1 à 29 % au cours de 81 essais sur des réseaux d'asperseurs en couverture intégrale, et de 8 à 21 % lors de 20 mesures au champ d'irrigation sur cultures, avec des températures pendant les expérimentations variant de 8 à 32 °C. Ils ont mis en évidence l'effet important du type de buse utilisé et de la pression d'utilisation qui influent fortement sur les pertes enregistrées.

D'autres essais sont fondés sur des mesures de la variation de la concentration ionique de l'eau d'irrigation ou en ajoutant du potassium. Dans le premier cas, McLean *et al.* (2000) trouvent des pertes atteignant au plus 7 à 8 % pour un système canon et enrouleur ; par contre, dans le second cas, avec des asperseurs basse-pression, utilisés pour des rampes latérales par exemple, Kohl *et al.* mesurent des pertes par évaporation variant de 0,6 à 1,4 %, ce qui est très faible.

Le type et les conditions de fonctionnement de l'équipement d'irrigation conditionnent la taille des gouttes et expliquent donc, avec les conditions météorologiques, la variabilité des observations rapportées dans la littérature. Si l'on exclut les mesures sur des temps courts, certaines valeurs très élevées difficilement explicables et les pertes par transport, les ordres de grandeur cités des pertes par évaporation se situent le plus souvent entre 10 à 30 %.

Pour un apport classique de 30 mm au cours d'une irrigation, cet ordre de grandeur conduit donc à des valeurs de 3 à 9 mm.

La question qui se pose dès lors est la suivante : l'eau évaporée correspond-t-elle en totalité à une perte ou est-ce une perte théorique en l'absence de culture ? Comme le font remarquer plusieurs auteurs et en particulier Seginer (1991), les conditions de mise en œuvre de l'irrigation influencent le phénomène. L'eau évaporée pendant l'apport réduit la demande évaporative de l'air suite à l'abaissement de température et à l'augmentation de l'humidité relative de l'air. Il en résulte donc une plus faible évapotranspiration de la culture elle-même. Il apparaît donc utile de ne pas dissocier l'eau évaporée E_a pendant les apports par irrigation et l'évapotranspiration ETM de la culture pendant la même période. Dans les publications indiquées, les informations sur le contexte climatique dans lequel ont été réalisées les mesures sont le plus souvent très restreintes et ne précisent pas l'existence éventuelle d'effets advectifs (transfert de masses d'air sèches provenant des surfaces voisines)

L'évaluation de l'évapotranspiration d'une culture irriguée par aspersion en condition de forte demande évaporative

L'évapotranspiration peut être raisonnée à partir d'une approche physique fondée sur le bilan d'énergie, que l'on peut résumer de manière

très simplifiée en admettant que l'ensemble de l'énergie disponible (énergie radiative due au rayonnement solaire et énergie convective au-dessus d'une surface donnée) est utilisé pour évaporer de l'eau lorsqu'elle est disponible. La quantité maximale d'eau qui peut être évaporée correspond à E_{tref} , comme indiqué plus haut.

Lorsqu'une irrigation est réalisée sur une culture entourée de parcelles sèches (chaumes de céréales en été, par exemple), on peut considérer, que l'on se rapproche du cas de l'oasis (Allen et Pereira, 1998). D'une part, il se produira un transfert d'énergie de ces parties sèches vers la parcelle irriguée et d'autre part, de l'eau libre sera présente au voisinage du couvert végétal et modifiera l'humidité relative de l'air ambiant. Dans le cas d'une parcelle bien alimentée en eau en dehors d'une période d'apport par aspersion, la végétation exerce un contrôle sur les transferts notamment par fermeture des stomates et cet effet est atténué à une assez courte distance du bord de la parcelle (Itier *et al.*, 1994 ; Brunet *et al.*, 1994).

Comment quantifier la majoration de la quantité d'eau évaporée due à l'effet oasis ?

Il est communément admis que l'effet oasis, conduit à une demande climatique très supérieure à E_{tref} . Une analyse précise de l'effet d'advection serait à réaliser pour chaque situation. Dans le cas où l'évaporation réelle d'une zone donnée est très faible, l'évaporation de la zone bien irriguée qui la jouxte tend vers une valeur double de celle que l'on aurait si l'ensemble de la zone était bien alimentée en eau comme le précise Guyot (1997) dans le cas de l'oasis.

Cette valeur établie par Bouchet (1964) ne s'applique selon Seguin (1975) qu'à des cas particuliers, cependant nous la retiendrons comme borne supérieure de l'estimation, en considérant que l'apport d'eau pendant l'irrigation se fait à proximité immédiate du sommet du couvert végétal et que l'effet d'advection est maximum. Pendant la durée de l'irrigation, le majorant de la quantité d'eau évaporée pendant le trajet de l'eau au-dessus de la culture et de l'eau évapotranspirée par la culture est donc :

$$2 E_{tref} (\text{durée d'irrigation}) \quad (3)$$

Pendant le reste de la journée, la culture aura une évapotranspiration égale à E_{TM} :

$$E_{TM} (\text{durée du jour hors irrigation}) \quad (4)$$

La lame totale L_i d'eau évaporée le jour de l'irrigation est donc :

$$L_i = 2 E_{tref} (\text{durée d'irrigation}) + E_{TM} (\text{durée du jour hors irrigation}) \quad (5)$$

Cette consommation en eau est à comparer à celle correspondant à une culture bien alimentée en eau sans irrigation, ce qui correspond par exemple à la situation rencontrée le lendemain de l'irrigation. La lame d'eau L_c libérée dans l'atmosphère par la culture est :

$$L_c = E_{TM} \quad (6)$$

Si on admet que la quantité d'eau perdue lors d'une irrigation de nuit est négligeable, la perte par évaporation en eau lors d'une irrigation de jour est alors :

$$P = L_i - L_c \quad (7)$$

À titre d'exemple, un calcul peut être effectué sur un cas théorique en Charente, avec l' E_{tref} maximale observée en 2003.

Prenons tout d'abord le cas limite 1, où l'on considère l'irrigation réalisée au milieu de la journée, période correspondant à 80 % de l' E_{tref} du jour, soit pour une E_{tref} de 7,7 mm avec un effet d'oasis « parfait » pendant l'irrigation, on a d'après (3) :

$$2 E_{tref} (\text{période d'irrigation}) = 2 \times 7,7 \times 0,8 = 12,3 \text{ mm}$$

et pendant le reste de la journée, si l'on suppose que cet effet d'oasis est négligeable, toujours par simplification, on aura donc d'après (1), (2) et (4) :

$$E_{TM} (\text{période du jour hors irrigation}) = 0,2 \times 1,15 \times 7,7 = 1,8 \text{ mm}$$

D'où la lame d'eau évaporée le jour de l'irrigation :

$$Li = 14,1 \text{ mm}$$

Si l'irrigation avait été effectuée avant le lever du jour, la lame d'eau évaporée par la culture aurait été :

$$Lc = ETM = 1,15 \times 7,7 = 8,9 \text{ mm}$$

Le majorant des pertes pour une irrigation de jour est donc :

$$P = Li - Lc = 5,2 \text{ mm}$$

Par rapport à une irrigation « classique » de 30 mm pratiquée avant le lever du jour, le majorant du pourcentage de pertes est donc de 17 %, alors que si l'on ne tient pas compte de la lame d'eau évaporée par la culture en l'absence d'irrigation, on estime à tort que ce majorant est de 41 %. On peut remarquer que cette valeur est de l'ordre de grandeur de certains montants rapportés dans la littérature comme correspondant aux pertes « brutes ».

DISCUSSION

Plusieurs critiques peuvent être portées sur le calcul effectué, qui se place dans des conditions très défavorables, si l'on avait estimé que l'effet d'oasis se maintenait après l'irrigation, ou au cours d'une journée sans irrigation, les pertes auraient été nulles ! Le calcul a d'autre part été effectué pour la journée avec la demande évaporative la plus élevée rencontrée à Angoulême en 2003.

Un autre calcul effectué pour l'Étref moyenne (Étref = 5,0 mm) du mois de juillet 2003 donne des pertes :

$$P = 3,4 \text{ mm soit } 11 \%$$

Il est probable que dans le cas général, il peut exister un effet d'oasis, mais il est moins important que celui qui a été pris en compte ici, les pertes sont donc largement inférieures. Compte tenu de l'évolution de l'Étref au cours de la journée, toutes choses étant égales par ailleurs, les pertes sont les plus élevées autour du midi solaire et diminuent rapidement ensuite. Par contre, les pertes par transport par le vent hors de la parcelle cultivée sont exclues de l'estimation.

Le pourcentage de pertes est évidemment fortement influencé par la dose d'irrigation. Ce constat milite en faveur de l'application de doses élevées,

qui se traduirait par une réduction du nombre des irrigations. Cependant, il faut se garder de simplifications abusives, car les doses doivent rester compatibles avec les capacités de stockage du sol, sinon elles induisent des pertes par drainage (et un lessivage des engrais et éventuellement du ruissellement...)

Le calcul de l'évaporation additionnelle par saturation de l'air

La méthode précédente traite de la problématique des pertes par une estimation globale de l'évapotranspiration. Il convient de la considérer comme une approche très sommaire pour évaluer les pertes par évaporation. Elle n'évalue pas directement l'évaporation de l'eau lors de son transport depuis la buse d'un système d'irrigation. En outre, elle intègre mal l'effet du vent ; c'est pourquoi il paraît intéressant de la confronter à la méthode suivante qui évalue la perte dans le volume d'air concerné par l'irrigation.

Considérons une zone irriguée de largeur l et de longueur L soumise à un vent de vitesse V suivant la plus grande dimension de la zone. La température de l'air T_a et l'humidité relative HR seront supposées constantes dans le volume d'air d'une hauteur h sous l'influence de l'apport d'eau par irrigation (figure 2).

La lame d'eau évaporée par unité de temps et par unité de surface est :

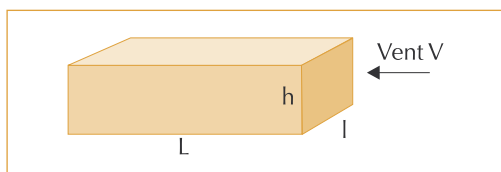
$$E = l h V \Delta\rho W / L l \quad (8)$$

Avec ρ masse volumique de l'air ΔW variation de la teneur en eau du fait de l'évaporation, soit :

$$E = h V \Delta\rho W / L \quad (9)$$

Il faut calculer :

$$\Delta W = W_{th} - W_{tr} \quad (10)$$



◀ Figure 2 – Schéma de principe d'une zone irriguée avec son volume influencé par l'apport d'eau d'irrigation.

avec T_h température humide, si l'on fait l'hypothèse que du fait de la présence d'eau, la température de l'air dans ce volume passe de T_a à T_h et T_r température du point de rosée. Notons que le passage à la saturation sur la hauteur h se fait de façon progressive. Notre hypothèse qui nous amène à dire que la hauteur h est dans son ensemble à saturation va plutôt dans le sens d'une surestimation des pertes par évaporation selon cette deuxième approche.

Application au cas d'un pivot de 300 mètres de longueur

CAS 1

Prenons des conditions qui pourraient constituer un cas extrême au midi solaire en Charente, mais une situation possible en Provence après une journée de mistral (l'irrigation étant évidemment exclue un jour de mistral). La vitesse du vent retenue correspond à des conditions normales d'irrigation, dans lesquelles les hypothèses simplificatrices retenues restent acceptables.

$$T_a = 30 \text{ °C} \quad HR = 30\%$$

D'après les abaques psychrométriques :

$$\begin{aligned} T_h &= 18 \text{ °C} & W_{th} &= 13 \text{ g/kg air sec} & \rho &= 1,22 \text{ kg/m}^3 \\ T_r &= 1 \text{ °C} & W_{Tr} &= 4,5 \text{ g/kg air sec} & \rho &= 1,28 \text{ kg/m}^3 \\ && \text{Vitesse du vent } v &= 2 \text{ m/s} \\ && \Delta pW &= 10,1 \end{aligned}$$

Pour une hauteur $h = 5$ m, la lame d'eau évaporée E est de 1,2 mm/h, soit 24 % pour des apports de 5 mm/h, pluviométrie horaire classique en irrigation par aspersion.

CAS 2

En prenant une situation identique, mais avec une humidité relative de l'air plus fréquente $HR = 60 \%$, on obtient **$E = 0,84$ mm/h, soit 13 % pour des apports de 5 mm/h.**

Si on prend des cas fréquents, on se situerait donc encore entre 10 et 15 % en milieu de journée.

Conclusions et recommandations possibles

Du fait des données contradictoires disponibles dans la littérature, une estimation d'un majorant des pertes est envisagée à partir d'une représentation très simplifiée des phénomènes, en se fondant sur l'effet d'oasis, qui surestime l'effet

d'un environnement aride autour d'une parcelle irriguée. Dans les cas de situations courantes, les pertes nettes par évaporation sont probablement inférieures à 10 % pour un apport par irrigation de 30 mm. Les calculs sommaires effectués ici et les données de la littérature analysées dans le cadre de ce travail corroborent les travaux menés par Huber (1992) sur le sujet. Outre l'importance du vent, l'auteur signale également le caractère déterminant de la température de l'eau d'irrigation sur ces pertes par évaporation. Pour disposer d'une estimation fiable des pertes par évaporation, une campagne de mesures dans les conditions représentatives des zones irriguées serait particulièrement souhaitable, compte tenu de l'impact reconnu de l'irrigation sur les modifications du climat local (diminution du pouvoir évaporant de l'atmosphère) et de l'absence de références fiables dans ce domaine. Les seules mesures réalisées le plus souvent dans des conditions isolées pour des contraintes d'organisation ne sont pas transposables dans une zone irriguée.

Les pertes peuvent être minorées dans les situations climatiques extrêmes en évitant les irrigations autour du midi solaire, sachant par exemple qu'en juillet, lors d'une journée sans passage nuageux, la période contribuant pour 50 % à l'Étref est approximativement la plage horaire 11-15 h (heure solaire) et l'effet du vent ne doit pas être sous-estimé. En effet, il ne faut pas oublier que les pertes en eau deviennent élevées en conditions ventées, ce qui peut se produire de jour, mais aussi de nuit.

En conditions expérimentales, il est d'usage de ne pas irriguer lorsque la vitesse du vent atteint 2 m/s, soit 7,2 km/h pour conserver une très bonne homogénéité des apports. Dans le contexte de l'exploitation agricole, compte tenu des contraintes d'organisation des chantiers, cette valeur est très souvent largement dépassée, ce qui génère dans bien des cas des pertes hors de la parcelle, lorsqu'elle est de petite dimension. Enfin, il est en outre unanimement reconnu que l'utilisation d'un matériel d'aspersion adéquat (*Guide pratique Irrigation*, 2003) avec une pression adaptée est indispensable pour limiter la formation de trop fines gouttelettes, plus sensibles à la fois au vent et à l'évaporation. Le logiciel IRRIPARC (Granier *et al.*, 2003), dans le cas du canon enrouleur, est à ce titre intéressant pour proposer des conseils d'utilisation dans les conditions climatiques d'une région donnée. □

Résumé

Le présent article propose une évaluation des pertes par évaporation lors des irrigations par aspersion durant la journée, en présence d'une demande climatique élevée. Cette évaluation s'appuie sur des résultats issus de la littérature, analysés et critiqués, ainsi que sur deux méthodes simplifiées. La première met en exergue les échanges de masses d'air par advection (effet d'oasis), la deuxième met en jeu l'évaporation additionnelle par saturation de l'air. Les deux méthodes, en accord avec les informations de la littérature qui méritent d'être retenues, proposent comme majorant des pertes par évaporation en condition de demande climatique extrême une valeur de l'ordre de 15 %. Dans ces conditions et dans un souci d'économie d'eau, il est recommandé d'éviter d'irriguer durant la plage horaire 11-15 h, et de manière générale lorsque la vitesse du vent atteint et dépasse le seuil admis pour le système d'irrigation utilisé. En conditions normales, ces pertes s'avèrent être largement inférieures à 10 % durant les irrigations où des doses d'une trentaine de mm sont généralement apportées.

Abstract

Evaporation losses during irrigation are evaluated on the basis of literature results and using two simple methods. The first method focuses on the advection phenomenon while the second deals with the additional evaporation induced by air saturation. For extreme climatic conditions, both propose evaporation losses the overvalue of 15%. The latter is in agreement with some pertinent literature results. Under such conditions and for water saving purposes, irrigation shortages should be recommended from 11am to 15pm and from a general point of view, irrigation should be avoided when the wind speed reaches the threshold value for the used irrigation system. Under usual conditions, these losses are much lower than 10% during irrigation using water application depths in the range of 30 mm.

Bibliographie

- ALLEN, R.-G. ; PEREIRA, L.-S. ; REAS, D. ; SMITH, M., 1998, Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements, *FAO Irrig. and Drain. Paper*, 56.
- BOUCHET, R.-J., 1964, Évapotranspiration réelle et potentielle : facteurs climatiques, *in l'Eau et la production végétale*, INRA, Paris, p. 155-166.
- BRUNET, Y. ; ITIER, B. ; MCANENEY, K.-J. ; LAGOUARDE, J.-P., 1994, Downwind evolution of scalar fluxes and surface resistance under conditions of local advection. Part II: measurements over barley, *Agric. and Forest Meteorol.*, 71, 3-4, p. 227-245.
- DOOREMBOS, J. ; PRUITT, W.-O, 1975, Les besoins en eau des cultures, *Bull. Irrig et Drain.*, n° 24, FAO Rome, 198 p.
- FROST, K.-R. ; SCHWALEN, H.-C., 1955, Sprinkler evaporation losses, *Agric. Engin.*, 36(8), p. 526-528.
- GRANIER, J ; MOLLE, B. ; DEUMIER, J.-M. ; LACROIX, B., 2003, Optimisation des réglages et de l'utilisation des systèmes d'irrigation par canon enrouleur, *Ingenieries EAT*, N° spécial 2003, p. 125-140.
- Guide Pratique Irrigation, 2003, 3^e édition, ouvrage collectif, L. RIEUL et P. RUELE coord., Cemagref Éditions.
- GUILLOT, G., 1997, *Climatologie de l'environnement*, Masson Édit., 505 p.

HERMSMEIR, L.-F., 1973, Evaporation during sprinkler application in a desert climate, *ASAE Paper n° 73-216*, St Joseph MI California.

HUBERT, L. ; DUBOIS DE LA SABLONNIÈRE, F., 1992, L'aspersion est-elle synonyme de fortes pertes par évaporation pendant les heures chaudes de journées estivales ?, *Perspectives agricoles*, n° 170, juin 1992.

ITIER, B. ; BRUNET, Y. ; MCANENEY, K.-J. ; LAGOUARDE, J.-P., 1994, Downwind evolution of scalar fluxes and surface resistance under conditions of local advection. Part I. A reappraisal of boundary conditions, *Agric and forest and meteorol.*, (71), n° 34, p. 211-225.

BRUNET, Y. ; ITIER, B. ; MCANENEY, K.-J. ; LAGOUARDE, J.-P., 1994, Downwind evolution of scalar fluxes and surface resistance under conditions of local advection. Part II: measurements over barley, *Agric. and Forest Meteorol.*, 71, 3-4, p. 227-245.

KOHL, K.-D. ; KOHL, R.-A. ; DEBOER, D.-W., 1987, Measurement of low pressure sprinkler evaporation losses, trans. of ASAE, *Am Soc. of Agric Engin.*, vol. 30(4) Jul-Aug 1987, p. 1071-1074.

LORENZINI, G., 2002, Air temperature effect on spray evapotranspiration in sprinkler irrigation, *Irrig and Drain*, n° 51, p. 301-309.

MAILHOL, J.-C. ; OLUFAYO, O. ; RUELLE, P., 1997, AET and yields assessments based on the LAI simulation. Application to sorghum and sunflower crops, *Agricultural Water Management revue*, n° 35, p. 167-182.

MCLEAN, R.-K. ; SRI RANJANI, R. ; KLASSEN, G., 2000, Spray evaporation losses from sprinkler irrigation systems, *Canadian agric. Engin.*, vol. 42, n° 1.1-1.15.

ORTEGA, J.-F. ; TRAJUELO, J.-M. ; MONTERO, DE JUAN, J.-A., *Discharge efficiency in sprinkler irrigation: analysis of the evaporation and drift losses in semi arid areas*, CIGR, 20 p.

SCHNEIDER, A.-D., 2000, Efficiency and uniformity of the LEPA and spray sprinkler methods: a review, trans. of ASAE, *Am Soc. of Agric Engin*, vol. 43(4), p. 937-944.

SEGINER, I., 1966, Net losses in sprinkler irrigation, *Agric. Meteorology*, n° 3, p. 281-291.

SEGINER, I. ; KANZ, D. ; NIR, D., 1991, The distortion by wind of the distribution patterns single sprinkler, *Agr. Water Manag.*, n° 19, p. 341-359.

SEGUIN B., 1975, Influence de l'évapotranspiration régionale sur la mesure locale d'évapotranspiration potentielle, *Agric. Météorolog.*, n° 15, p. 355-370.

SPURGEON, W.-E. ; THOMPSON, T.-L. ; GILLEY, J.-R., 1983, Irrigation management using hourly spray evaporation loss estimates, *ASAE Paper*, N° 83-2591, St Joseph MI California.