



# Evaluation des performances des arrosages de la canne à sucre irriguée à la raie

## Spécificités de l'irrigation à la raie

L'irrigation à la raie est la technique utilisée sur la majorité des périmètres sucriers. Consommatrice de main-d'œuvre pour la conduite de l'irrigation, mais nécessitant des investissements faibles et des frais de pompage limités du fait de la non mise en pression de l'eau d'irrigation, cette technique est la plus prise dans les pays émergents. Bien qu'elle permette, lorsqu'elle est bien conduite, d'obtenir des rendements élevés (110 t/ha à la Compagnie sucrière sénégalaise, SENE, 1999), les performances de l'irrigation à la raie limitent bien souvent la productivité de la culture en raison de sa faible efficacité (0,4 m<sup>3</sup> d'eau /kg de sucre produit sur le périmètre de Kenana au Soudan). Outre l'hétérogénéité des apports le long de la raie (engorgement en tête, et sous-irrigation à l'extrémité), les importantes pertes par percolation induites par une mauvaise conduite tendent, dans bien des cas, à provoquer une remontée des nappes et à amorcer des processus de sodisation des sols (Sukala, Mali). Ce risque est d'autant plus grave en irrigation gravitaire, que cette sodisation dégrade la structure du sol et diminue sa capacité d'infiltration et, en conséquence, les performances des arrosages.

Le poste « irrigation » représente souvent plus de la moitié des charges de culture ; de ce fait, l'amélioration des performances de l'irrigation est, sur la majorité des périmètres irrigués par gravité, un préalable à l'amélioration de leur viabilité économique.

La spécificité du pilotage de l'irrigation à la raie réside dans le fait qu'il est nécessaire de déterminer, outre la fréquence des arrosages, la meilleure combinaison possible entre le débit en tête de raie, la longueur de la raie, la pente de la raie et la durée de l'arrosage de telle sorte que la dose infiltrée le long de la raie soit proche des besoins nets en irrigation de la culture et la plus uniforme possible avec un minimum de pertes en colature (eau non infiltrée dans la raie allant dans le réseau de drainage) et par percolation. Ceci implique de prendre en compte, à la fois les besoins en eau de la culture, et les performances de l'irrigation à la parcelle.

C'est pour répondre à cette problématique spécifique que le Cirad (MARLET *et al.*, 1996) a été amené à développer le modèle SEPI (Système d'évaluation et de planification des irrigations), qui intègre un module classique d'estimation des besoins en eau d'irrigation par calcul du bilan hydrique, et un module de caractérisation du fonctionnement de l'irrigation à la raie.

B. LIDON

Plaza Bisness Kenang,  
3<sup>rd</sup> floor - Jalan Kemang Raya 2  
12730 Jakarta Selatan, Indonésie  
bruno.lidon@cirad.fr

S. MARLET

Cirad-amis, avenue Agropolis,  
34398 Montpellier Cedex 5, France

A. CLOPES

Cirad-amis, Maison de la télédétection  
500 rue Jean-François Breton  
34093 Montpellier Cedex 5, France

## Conception générale du logiciel SEPI

Le logiciel SEPI est constitué de deux modules de calcul indépendants :

- un module de calcul du bilan hydrique de la culture ;
- un module d'estimation des performances de l'irrigation à la raie.

Une interface est constituée par un fichier descriptif des performances de l'irrigation (figure 1). L'utilisation du modèle permet soit d'évaluer des pratiques d'irrigation en estimant le niveau de satisfaction des besoins en eau de la culture due à ces pratiques, soit d'élaborer des recommandations de pratiques d'irrigation permettant d'atteindre un objectif choisi de satisfaction des besoins en eau de la culture.

### Le module de calcul du bilan hydrique

Calculé au pas de temps journalier et prenant en compte les caractéristiques du milieu (pluie, Etp), de la plante (date de semis, longueur du cycle, longueur des différentes phases physiologiques, profondeur maximum d'enracinement, vitesse de développement racinaire), du sol (stock d'eau initial, réserve utile racinaire et la capacité d'extraction de l'eau du sol par la culture), le modèle permet d'évaluer des pratiques d'irrigation ou de déterminer un planning adapté aux contraintes formulées.

Dans le cas d'une évaluation de pratiques d'arrosage, le modèle calcule les termes du bilan hydrique de la culture à partir d'un calendrier de réalisation des irrigations, en spécifiant les dates et les doses nettes d'apport. L'évaluation des doses nettes est réalisée, si nécessaire, à partir de données descriptives du fonctionnement de l'irrigation à la parcelle, générées par le module d'estimation des performances de l'irrigation à la raie (fichiers.D0Z ou .SOL ).

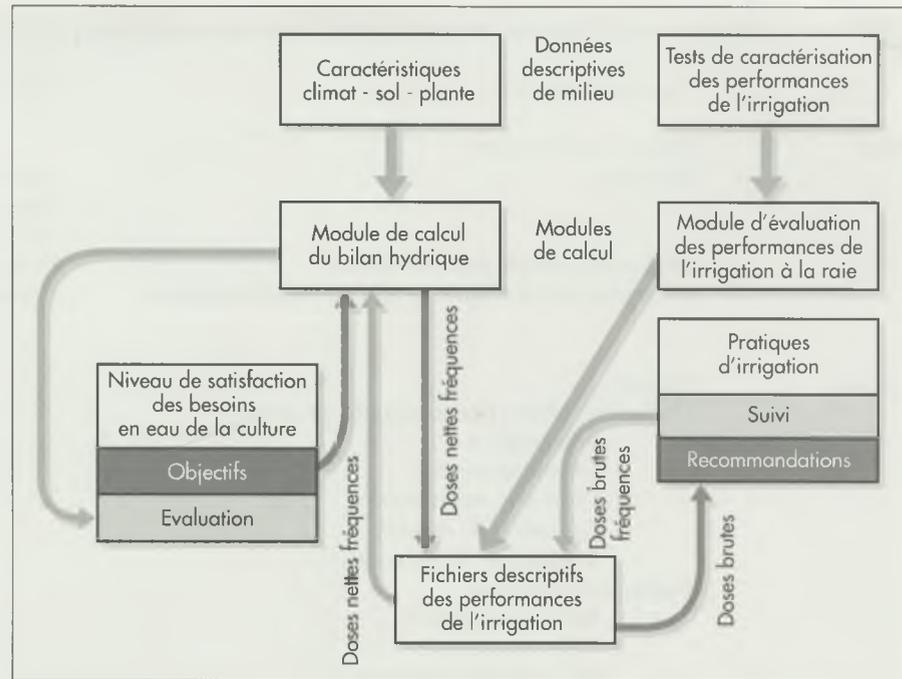


Figure 1. Conception générale du logiciel SEPI.

Le calcul du bilan hydrique permet de déterminer, au pas de temps journalier, l'Etr (évapotranspiration réelle de la culture) à partir de l'équation générale du bilan de volume entre les apports (pluie efficace, et doses d'irrigation infiltrée), les sorties par évaporation et les pertes par percolation, et la lame d'eau stockée dans le sol (tableau 1).

$$ST_{(i)} - ST_{(i-1)} = P_{\text{eff}(i)} + IRR_{(i)} - ETR_{(i)} - PER_{(i)}$$

Avec :

- $i$  : jour du calcul
- $IST_{(i)}$  : lame d'eau stockée au jour  $i$  en mm
- $P_{\text{eff}(i)}$  : pluie efficace au jour  $i$  en mm
- $IRR_{(i)}$  : dose nette d'irrigation apportée
- $ETR_{(i)}$  : évapotranspiration réelle de la culture
- $PER_{(i)}$  : lame d'eau perdue par percolation.

La plupart des algorithmes du modèle, évolution du coefficient cultural en fonction de la phase physiologique et du temps écoulé depuis la plantation, accroissement de la réserve utile racinaire au cours du cycle sont ceux utilisés par le modèle IRSIS (RAES *et al.*, 1988) développé par l'université de Leuven (Belgique), en collaboration avec la

Fao. Seul le mode de calcul de l'Etr varie (encadré 1).

Dans le cas d'une planification des irrigations ou de l'évaluation d'un planning prévisionnel, différentes options permises par le modèle permettent de décrire la conduite des arrosages choisie tant au niveau de la fréquence des irrigations que de la dose nette apportée (tableaux 2 et 3).

Les variables de sortie du bilan hydrique sont récapitulées par le tableau 4 et sont fournies soit de façon détaillée (bilan journalier, pentadaire ou décadaire pour une année sélectionnée), soit globalement pour l'ensemble du cycle de la culture. Dans ce dernier cas, les résultats peuvent être présentés pour l'ensemble du cycle des années de simulation ou, après analyse fréquentielle : valeur minimum, maximum et pour un seuil de dépassement de 80 %, 50 % et 20 %, si au moins 10 années pluviométriques ont été prises en compte dans la simulation. Pour une année sélectionnée, les résultats peuvent être représentés sous deux types de graphique, le premier illustrant la dynamique des flux hydriques dans la zone racinaire (stock hydrique dans



Tableau 1. Données d'entrée utilisées par le module de bilan hydrique du logiciel SEPI.

Fichier	Type de données	Options
Sol	Réserve utile (mm/m) Pluie utile  Dose nette infiltrée pour 1/4 de raie en fonction de la fréquence et d'un débit d'irrigation	Option 1 : pas de ruissellement Option 2 : seuil et coefficient de ruissellement Option 3 : méthode Orstom Données issues du module « caractérisation des performances de l'irrigation »
Plante	Culture Durées des phases phénologiques (en jours) Implantation Développement Floraison, reproduction Formation du produit Maturation, sénescence Coefficients culturaux KC1 : implantation KC2 : maximum KC3 : fin de sénescence Sensibilité au stress hydrique Implantation Développement Floraison, reproduction Formation du produit Maturation, sénescence Enracinement de la culture Profondeur maximum d'enracinement Vitesse de croissance racinaire Taux de réserve en eau du sol, facilement utilisable par la plante	
Etp	Evapotranspiration potentielle Données décennales	Option 1 : valeurs annuelles Option 2 : valeurs moyennes interannuelles
Pluies	Données pluviométriques journalières	

Tableau 2. Options de fréquences des irrigations prises en compte par le modèle SEPI.

Option	Descriptif
Option 1	Pas d'irrigation
Option 2	Choix des dates d'irrigation, l'irrigation sera supprimée si la satisfaction des besoins est assurée jusqu'à l'irrigation suivante
Option 3	Fréquence fixe et décalage de la date des irrigations en fonction des épisodes pluviométriques
Option 4	Fréquence fixe et suppression de l'irrigation si les besoins en eau sont satisfaits jusqu'à l'irrigation suivante
Option 5	Déclenchement de l'irrigation à la demande lorsque les besoins en eau ne sont plus assurés

Tableau 3. Options de dose nette d'irrigation prises en compte par le modèle SEPI.

Option	Descriptif
Option 1	Pas d'irrigation
Option 2	Dose fixe
Option 3	Retour à la capacité de rétention : apport d'une dose telle qu'elle assure le remplissage de la réserve hydrique correspondant à la profondeur d'enracinement majorée du nombre de jours de croissance racinaire jusqu'à la prochaine irrigation
Option 4	Retour à la capacité de rétention : apport d'une dose telle qu'elle assure le remplissage de la réserve hydrique correspondant à la profondeur d'enracinement majorée de cinq jours de croissance racinaire

Encadré 1

## Le choix du mode de calcul de l'Etr

Le module de calcul du bilan hydrique dissocie l'évapotranspiration de la culture de l'évaporation du sol lorsque la culture ne couvre pas la totalité du sol.

$$ETR_{(i)} = ER_{(i)} + TR_{(i)}$$

avec :

$ER_{(i)}$  : évaporation réelle du sol au jour i

$TR_{(i)}$  : évapotranspiration réelle du couvert végétal au jour i.

- L'évapotranspiration réelle du couvert végétal  $TR_{(i)}$  est calculée en fonction :
  - du coefficient cultural  $Kc_{(i)}$  ;
  - de l'évaporation potentielle  $ETP_{(i)}$  ;
  - du taux de remplissage de la réserve racinaire ;
  - de la fraction p de la réserve en eau du sol qui est facilement utilisable par la culture.

L'algorithme suivant est utilisé :  $TR_{(i)} = \min (TM_{(i)} ; K HR_{(i)}^2)$

avec

$TM_{(i)}$  : évapotranspiration réelle du couvert végétal au jour i  $TM_{(i)} = Kc_{(i)} ETP_{(i)}$

$$K = Kc_{(i)} ETP_{(i)} / (1 - p)^2$$

$Kc_{(i)}$  : coefficient cultural au jour i

$ETP_{(i)}$  : évapotranspiration potentielle au jour i.

p : défini plus haut, est lié au type de culture, à l'importance de la demande climatique, aux propriétés du sol (texture, structure) influençant la densité racinaire et par là même la capacité du sol à conduire l'eau du sol (DOORENBOS et KASSAM, 1987).

$HR_{(i)}$  : taux de remplissage de la réserve utile racinaire, exprimée par le rapport entre la lame d'eau stockée dans le sol et la lame d'eau maximale que le profil racinaire permet de stocker.

- L'évaporation réelle du sol prise en compte lorsque la culture ne couvre pas totalement le sol est définie par l'algorithme :  $ER_{(i)} = Ke EP_{(i)}$

avec :

$ER_{(i)}$  : évaporation réelle du sol au jour i

$EP_{(i)}$  : évapotranspiration potentielle du sol au jour i.  $EP_{(i)} = (1 - Kc_{(i)}) ETP_{(i)}$

$Ke_{(i)}$  : coefficient d'évaporation du sol qui est fonction du type de sol et de son état d'humectation.

$Ke_{(i)}$  est calculé par l'algorithme suivant :  $Ke_{(i)} = Ke1_{(i)} Ke2_{(i)}$

avec:

$Ke1_{(i)}$  : coefficient exprimant l'influence de la demande évaporative,

$Ke1_{(i)} = \exp (-n_{(i)} EP_{(i)} / 16)$ ,  $n_{(i)}$  étant le nombre de jour depuis la dernière humectation du sol.

$Ke2_{(i)}$  : coefficient permettant de prendre en compte le type de sol. Ce coefficient est égal à 0 lorsque le nombre de jours depuis la dernière humectation du sol est supérieur à la durée  $td$  d'assèchement du sol en surface exprimée en jours, avec  $td = 1,14 + 0.0238 RU$ ,  $RU$  étant la réserve utile du sol exprimée en mm/m. Dans le cas contraire la valeur du coefficient  $Ke2_{(i)}$  est calculée par la relation

$$Ke2_{(i)} = 1 - (n_{(i)} / td)^{0,5}$$

La dissociation de l'évaporation du sol et de la transpiration du végétal est importante pour l'évaluation précise de l'Etr car après plantation ou récolte, la canne met plusieurs mois pour couvrir complètement le sol.

l'horizon racinaire, stock hydrique potentiel correspondant à la profondeur humectée), le second permettant d'illustrer le bilan cumulé des flux hydriques (évolution cumulée des pluies, irrigation, drainage, transpiration de la culture, évapotranspiration réelle, transpiration potentielle et Etp).

## Le module d'évaluation des performances de l'irrigation à la raie

On distingue 4 phases dans le fonctionnement de l'irrigation à la raie :

- l'avancement, correspondant à la période de temps entre l'instant où l'eau commence à s'écouler ( $t_0$ ) et l'instant où elle atteint l'extrémité aval de la raie ( $t_f$ ) ;
- l'entretien, période de temps entre l'instant où l'avancement est terminé ( $t_f$ ) jusqu'à l'instant où on coupe l'alimentation ( $t_a$ ) ;
- la déplétion, période de temps entre l'instant d'arrêt de l'irrigation ( $t_a$ ) et l'instant où l'eau disparaît dans la raie ;
- la récession, correspondant à la période où l'eau disparaît de la raie.

La durée d'infiltration dont dépend la lame d'eau infiltrée varie donc le long de la raie puisqu'elle correspond à la différence entre l'instant d'arrivée de l'eau en un point x de l'extrémité amont et l'instant où la récession est vérifiée à la même distance.

L'évaluation des performances de l'irrigation à la raie nécessite, de ce fait, la détermination de la loi d'avancement de la lame d'eau et de récession ainsi que celle d'infiltration, afin de déterminer la dose infiltrée et sa variabilité le long de la raie.

Les paramètres des lois d'avancement et d'infiltration sont spécifiques des conditions d'humidité de la surface du sol (paramètre caractérisant la durée de la phase transitoire de l'infiltration dans la loi de Horton, paramètre B conditionnant l'avancement dans la loi simplifiée). L'état d'humidité du sol est estimé par la

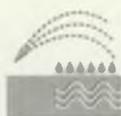


Tableau 4. Variables de sortie présentées par le modèle de bilan hydrique.

	Bilan global	Bilan détaillé
Résultats de simulation du bilan hydrique	Pluie (mm), pluie efficace (mm) Irrigation (mm) Evapotranspiration potentielle (Etp, mm) Evapotranspiration potentielle du couvert végétal (Tp, mm) Evapotranspiration réelle du couvert végétal (Tr, mm) Ratio Tr / Tp Evapotranspiration réelle (Er, mm) Drainage (mm)	
	Stock hydrique en fin de période	Rapport entre lame d'irrigation et lame drainée Rapport entre le rendement espéré et le rendement potentiel

durée (en jours) depuis le dernier arrosage ou la dernière pluie.

Le logiciel SEPI permet de stocker les doses moyennes infiltrées et la dose brute calculée dans un fichier spécifique (.DOZ) dans lequel la durée en jours ( $n_{(i)}$ ) depuis la dernière irrigation doit être spécifiée.

Les résultats peuvent aussi être archivés par type de sol dans un fichier (.SOL) qui permet de stocker, outre les caractéristiques des irrigations en fonction des fréquences d'arrosage, les caractéristiques hydrodynamiques du sol (réserve utile, seuil et pourcentage de ruissellement pour le calcul de la pluie efficace). Ces deux fichiers générés par le module « caractérisation des performances de l'irriga-

tion de SEPI » sont utilisables par le module « bilan hydrique ». Ils constituent l'interface entre les deux modules du modèle.

La nécessité de contrôler des débits et de mesurer l'avancement implique que les conditions des tests d'irrigation ne sont pas forcément représentatives des pratiques. Le logiciel SEPI permet dans ce cas d'extrapoler les résultats des tests en prenant en compte des modifications des paramètres de la conduite de l'irrigation. Ces modifications, relatives à une même fréquence d'irrigation, sont générées en utilisant des options (tableau 5).

On remarquera que le logiciel ne permet pas de simuler le cas où l'irri-

gation est arrêtée avant d'atteindre le bout de la raie. Pour prendre en compte des variations du débit, de la pente ou du coefficient de rugosité (coefficient de Manning), le logiciel modifie les lois d'infiltration et d'écoulement en prenant comme hypothèse que les paramètres  $F_o$ ,  $A_o$ , C et B sont proportionnels au périmètre mouillé.

## Exemple d'application du logiciel SEPI

L'application présentée se réfère à un diagnostic de la conduite de l'irrigation sur le périmètre sucrier de Kenana (Soudan). Ce diagnostic comprend :

- une simulation de la planification des irrigations d'une parcelle de canne intégrant les contraintes générales liées à l'exploitation du réseau d'irrigation ;
- une évaluation des performances hydrauliques de la conduite de l'irrigation à la parcelle ;
- une estimation du taux de satisfaction des besoins en eau de la culture en intégrant les performances de l'irrigation à la parcelle et les contraintes liées à l'exploitation du réseau.

Tableau 5. Liste des différentes options de SEPI permettant de modifier les paramètres de l'irrigation.

Paramètres modifiables	Options
Longueur de la raie	
Distance entre les raies	
Pente	
Coefficient de Manning	
Durée d'entretien	
Récession	Option 1 : récession négligée Option 2 : évolution linéaire Option 3 : méthode des 2 points Option 4 : raie bouchée Option 5 : récession simulée
Débit	

## Encadré 2

## Détermination des lois hydrauliques du fonctionnement de l'irrigation à la raie : avancement, récession, infiltration

Les équations de continuité exprimant la conservation de la masse et l'équilibre dynamique de l'écoulement étant de type différentielles partielles non linéaires de premier ordre n'ont pas de solutions explicites données. Aussi, l'évaluation des performances est faite par le modèle SEPI à partir de lois empiriques : soit la loi de Horton (BERTHOME *et al.*, 1989), soit une relation simplifiée (MAILHOL, 1992). La loi de récession est estimée par des relations simplifiées : soit linéaire, ce qui est une hypothèse acceptable pour des raies courtes, soit la méthode des deux points soit un ajustement log-linéaire.

Cette méthodologie est précisée dans MAILHOL et GONZALEZ (1993) et dans MAILHOL *et al.* (1997).

L'équation de la loi de Horton, utilisable pour tout type de sol, permet de prendre en compte une phase transitoire et un régime final de l'infiltration :

– pour la loi d'infiltration cumulée :

$$Z(t) = (F_0/\Theta) \times (1 - e^{-\Theta t}) + C \times t$$

– pour la loi d'avancement :

$$X(t) = A(1 - e^{-\alpha t}) + B(1 - e^{-\beta t})$$

avec

$$A = (Q / (\beta - \alpha)) (1 / A_0 \sigma + \alpha / C)$$

$$B = (Q / (\alpha - \beta)) (1 / A_0 \sigma + \beta / C)$$

$$\alpha = -(C + F_0 + A_0 \sigma \Theta) / (2 A_0 \sigma) + ((C + F_0 + A_0 \sigma \Theta)^2 - 4 C \sigma \Theta)^{0.5} / 2 A_0 \sigma$$

$$\beta = -(C + F_0 + A_0 \sigma \Theta) / (2 A_0 \sigma) - ((C + F_0 + A_0 \sigma \Theta)^2 - 4 C \sigma \Theta)^{0.5} / 2 A_0 \sigma$$

L'équation de la loi simplifiée est plus particulièrement adaptée aux sols fissurés (ou présentant une macroporité superficielle) pour lesquels la phase transitoire peut être considérée comme négligeable :

• pour la loi d'infiltration cumulée :

$$Z(t) = B + C \times t$$

• pour la loi d'avancement :

$$X(t) = L_m (1 - e^{-\alpha t})$$

avec

$$L_m = Q / C$$

$$\alpha = C / (A_0 \sigma + B)$$

L'ajustement mathématique de ces coefficients est réalisé conjointement sur la loi d'avancement et la loi d'infiltration.

Pour renseigner le modèle il est nécessaire de mesurer le débit en tête de raie (et en colature pendant la phase d'entretien), de disposer de données descriptives de l'avancement de l'eau et d'une mesure ou d'une évaluation du

volume d'eau stocké dans la raie pendant l'irrigation. Le logiciel permet de prendre en compte 4 à 10 données d'avancement. Pour s'assurer de la signification des paramètres d'avancement on aura intérêt à utiliser 8 à 10 mesures et si possible de prendre en compte 1 à 2 points de mesure sur le dernier tiers de la raie.

Les sorties du logiciel SEPI donnent les paramètres ajustés des lois d'avancement de l'infiltration ainsi que les principales caractéristiques de l'irrigation détaillées par les tableaux 6 et 7. La spécificité du logiciel est de donner les doses infiltrées par quart de raie (figure 2).

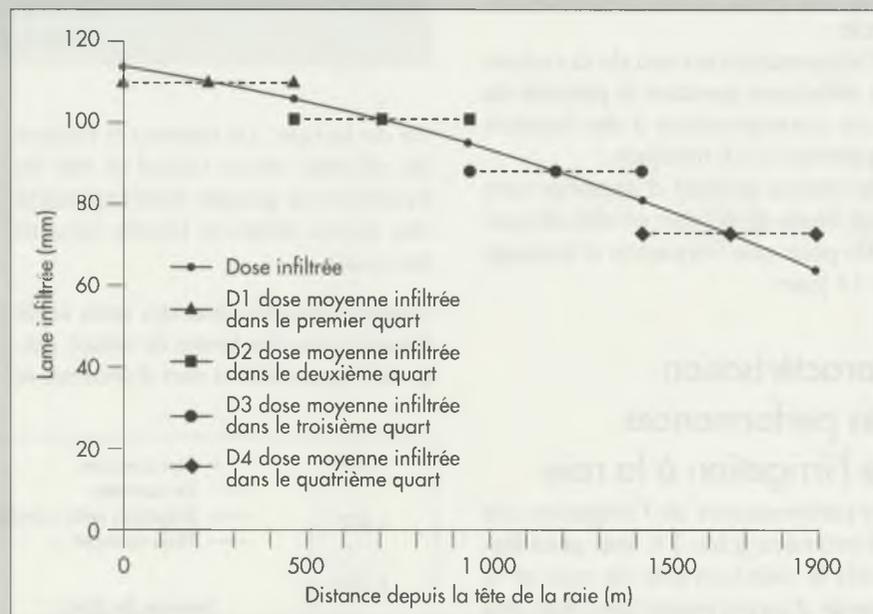


Figure 2. Illustration de la représentativité des doses moyennes par quart de raie données par le logiciel SEPI.

### Calendrier prévisionnel des irrigations

La planification des irrigations a été réalisée en se référant à une parcelle ayant une longueur de 1 900 m, une pente de 2,8 ‰ et un sol (de type vertisol) ayant une réserve utile estimée à 300 mm/m. Pour ce type de parcel-

le, les caractéristiques d'exploitation (LIDON, 1996) du réseau imposent :

– d'une part, des volumes pompés moyens de l'ordre 24 100 m<sup>3</sup>/ha sur l'ensemble du cycle dont 1 130 m<sup>3</sup>/ha pour la première irrigation puis 27 arrosages pendant le cycle correspondant à un volume brut moyen pompé par arrosage de 850 m<sup>3</sup>/ha ;

– d'autre part, une durée minimale entre 2 irrigations de 12 jours.

L'utilisation du module de bilan hydrique du logiciel SEPI permet de déterminer la dose nette correspondant à ces caractéristiques d'exploitation du réseau. Le calcul est réalisé en fixant la fréquence minimum des irrigations (tableau 2, option 3)



et en faisant varier la dose nette (tableau 3, option 2) jusqu'à obtenir un nombre d'arrosages pendant le cycle égal à 27. Ces calculs permettent d'évaluer la dose moyenne nette apportée par arrosage au cours du cycle à 27,8 mm pour une efficacité globale de l'irrigation de 35 % (le produit d'une efficacité de 50 % à la parcelle par une efficacité réseau de 70 %).

La figure 3 illustre le calendrier prévisionnel des irrigations (courbe cumulée des doses nettes apportées), ainsi que l'évolution cumulée au cours du cycle des besoins en eau de la culture (canne vierge plantée en février) et de son évapotranspiration réelle.

On remarquera que dans ces conditions :

- le taux de satisfaction des besoins en eau de la culture calculé par SEPI n'est que de 82 % sur l'ensemble du cycle ;
- l'alimentation en eau de la culture est déficitaire pendant la période du cycle correspondant à des besoins supérieurs à 5,6 mm/jour ;
- le réseau permet d'apporter une dose brute de 60 mm en tête de parcelle pour une fréquence d'arrosage de 12 jours.

### Caractérisation des performances de l'irrigation à la raie

Les performances de l'irrigation ont été estimées grâce à 6 tests pour lesquels le débit en tête de raie et la vitesse d'avancement de l'eau ont été suivis. Le tableau 6 illustre comment ces tests ont été réalisés. Chaque test a été traité par le module « évaluation des performances de l'irrigation ». Les tableaux 7 et 8 et la figure 4 donnent les résultats du premier test.

Afin de comparer les résultats de ces tests, les performances de l'irrigation ont été extrapolées par le logiciel SEPI pour des conditions identiques de conduite de l'irrigation : longueur de la raie 1 900 m, débit en tête de raie 7 l/s et arrêt de l'irrigation lorsque l'eau atteint la

Tableau 6. Conditions de réalisation des tests de caractérisation des performances de l'irrigation à la parcelle (Pente du sillon, 0,0028 ; largeur du fond du sillon, 0,68 m).

Numéro du test	Débit en tête en l/s	Durée de l'arrosage en minutes	Distance parcourue par l'eau au cours de l'arrosage en m
1	8,0	531	1 600
2	7,1	469	1 600
3	7,1	598	1 800
4	6,8	337	1 600
5	7,1	382	1 700
6	6,9	580	1 800

Tableau 7. Résultats de l'ajustement des lois d'avancement et d'infiltration par le logiciel SEPI (test 1).

Résultat de l'ajustement de la loi d'avancement  
 $X(t) = f(1 - \exp(-\alpha t)) + g(1 - \exp(-\beta t))$   
 Avec :  $g = 4,65 ; f = 4 410,74 ; \alpha = -0,00 ; \beta = -9,09$

Résultat de l'ajustement de la loi d'infiltration  
 $Z(t) = a(1 - \exp(-bt)) - ct$   
 Avec :  $a = 100,9107 ; b = 0,64 ; c = 0,1087$   
 Ecart type résiduel = 4,1107

fin de la raie. Le tableau 9 illustre les résultats de ce calcul et met en évidence la grande hétérogénéité des doses nettes et brutes suivant les essais.

Compte tenu de l'état des raies et de l'importance des fentes de retrait, cette hétérogénéité n'a rien d'anormal et

peut être considérée comme représentative de la diversité des conditions d'irrigation suivant les raies. Les doses infiltrées par quart de raie calculées par SEPI permettent d'évaluer, pour l'ensemble de l'échantillon, la qualité de la distribution des doses en ayant recours au coefficient d'uniformité de

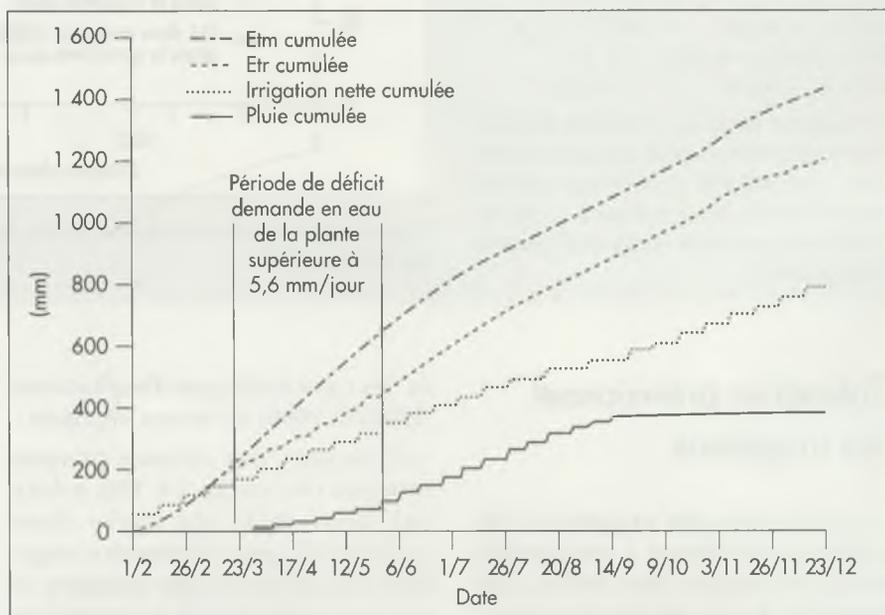


Figure 3. Calendrier prévisionnel des arrosages déterminé en fonction des caractéristiques générales d'exploitation du réseau.

Tableau 8. Evaluation des performances de l'irrigation par le logiciel SEPI (résultats du test 1).

Test	Numéro 1	Critères	Résultats
Longueur de la raie	1 600 m	Dose brute	101,8 mm
Pente	0,0028	Dose nette	76,9 mm
Coefficient Manning	0,03	Efficience hydraulique	75,5 %
Ecartement des raies	1,55 m	Dose moyenne infiltrée	89,1 mm
		Dose médiane infiltrée	90,0 mm
		Pertes par percolation	12,2 mm
Débit moyen	8,00 l/s	Pertes en colature	0,6 mm
Durée d'avancement simulée	526 mn	Coefficient uniformité	86,3 %
Dose infiltrée		Premier quart de la raie	99,9 mm
		Deuxième quart de la raie	93,6 mm
		Troisième quart de la raie	85,9 mm
		Quatrième quart de la raie	76,9 mm

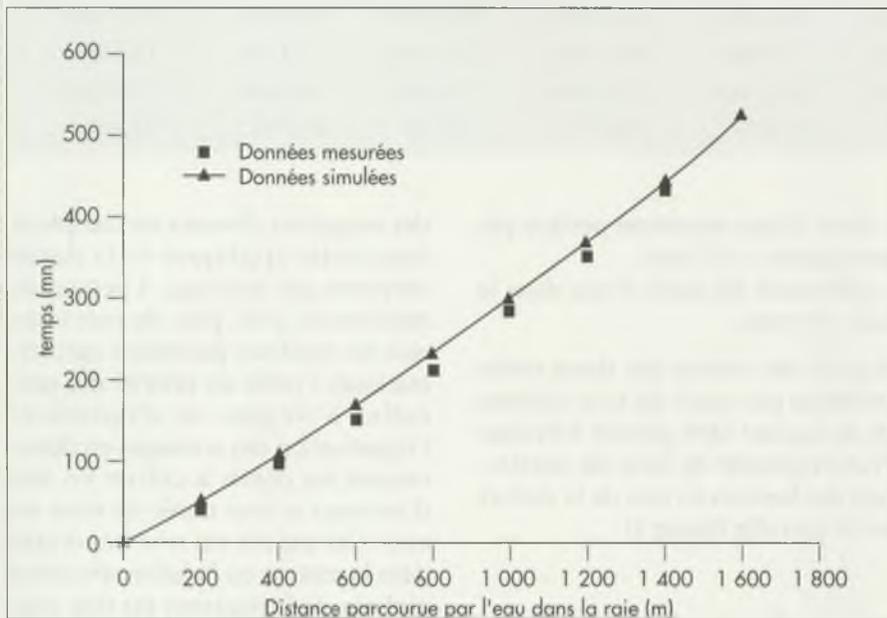


Figure 4. Comparaison des avancements mesurés et simulés par le logiciel SEPI (test 1).

Christiansen qui est habituellement utilisé pour l'irrigation par aspersion (CAMPAORE *et al.*, 1998). Ce coefficient atteint la valeur de 77 % qui n'est pas caractéristique d'une très mauvaise distribution spatiale des doses.

On admettra que le nombre de tests est suffisant pour que la valeur de la dose brute moyenne qui est de 82 mm soit significative. Cette valeur, de 37 % supérieure à celle

prise en compte dans l'exploitation du réseau (60 mm), impliquera une augmentation de la durée minimale entre 2 irrigations inversement proportionnelle au rapport des doses brutes afin de respecter la valeur du module d'équipement du réseau. L'évaluation des performances de l'irrigation conduit de ce fait à modifier le calendrier prévisionnel des irrigations en prenant une durée minimale entre deux irrigations de 16 au lieu de 12 jours.

## Evaluation des performances de l'irrigation à la parcelle

La première étape de cette évaluation sera de déterminer le calendrier optimum des irrigations en tenant compte de l'effet de la dose brute sur la durée minimale entre 2 irrigations. Le tableau 10 illustre ce planning calculé par SEPI sur la base d'une durée minimum entre 2 irrigations de 16 jours, une dose brute fixe de 82 mm et une efficience d'application à la parcelle égale à la moyenne inter-test soit 69 %. L'espacement des irrigations supérieur à 16 jours durant les mois de juillet et août est dû à l'effet conjugué d'une faible demande évaporative et d'apports pluviométriques.

Les résultats du bilan hydrique calculé par SEPI permettent d'estimer les performances globales de l'irrigation sur l'ensemble du cycle, intégrant performances hydrauliques et agronomiques :

- dose brute apportée (y compris 1<sup>ère</sup> irrigation) : 1 553 mm
- pluie efficace : 382 mm
- lame d'eau moyenne évapotranspirée par la culture : 1 356 mm
- pertes en colature : 271 mm

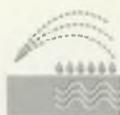


Tableau 9. Extrapolation des résultats des tests d'irrigation pour des conditions identiques de conduite de l'irrigation. (test 1).

Numéro du test	1	2	3	4	5	6
Longueur de la raie	1 900 m					
Pente	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028
Coefficient de Manning	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Ecartement des raies	1,55 m					
Débit moyen	7,00 l/s					
Durée d'avancement simulée	769 mn	560 mn	666 mn	418 mn	436 mn	617 mn
<b>Dose infiltrée :</b>						
– premier quart de la raie	114,5 mm	67,0 mm	97,5 mm	55,9 mm	53,6 mm	88,0 mm
– deuxième quart de la raie	105,3 mm	66,2 mm	88,9 mm	51,0 mm	50,1 mm	81,8 mm
– troisième quart de la raie	93,8 mm	65,3 mm	77,5 mm	44,0 mm	45,6 mm	74,1 mm
– quatrième quart de la raie	79,6 mm	64,3 mm	62,5 mm	34,2 mm	40,1 mm	64,7 mm
Dose brute	109,7 mm	79,9 mm	95,0 mm	59,6 mm	62,2 mm	88,0 mm
Dose nette	79,6 mm	64,3 mm	62,5 mm	34,2 mm	40,1 mm	64,7 mm
Efficience hydraulique	72,5 %	80,5 %	65,8 %	57,4 %	64,5 %	73,5 %
Dose moyenne infiltrée	98,3 mm	65,7 mm	81,6 mm	47,7 mm	47,4 mm	77,2 mm
Dose médiane infiltrée	95,3 mm	83,6 mm	83,6 mm	90,0 mm	47,9 mm	78,1 mm
Perte par percolation	18,7 mm	1,4 mm	19,1 mm	13,5 mm	7,3 mm	12,5 mm
Perte en colature	11,4 mm	14,2 mm	13,4 mm	11,9 mm	14,8 mm	10,8 mm
Coefficient uniformité	80,0 %	97,9 %	76,6 %	71,7 %	84,7 %	83,9 %

Tableau 10. Calendrier prévisionnel d'irrigation généré par SEPI pour une dose brute de 82 mm et une efficience de 69 % (exception faite pour la première irrigation).

Numéro de l'irrigation	Date	Durée entre 2 irrigations
1	31 janvier	
2	16 février	16
3	4 mars	16
4	20 mars	16
5	5 avril	16
6	21 avril	16
7	7 mai	16
8	23 mai	16
9	8 juin	16
10	24 juin	16
11	10 juillet	16
12	26 juillet	16
13	17 août	22
14	27 septembre	41
15	14 octobre	17
16	1 novembre	18
17	17 novembre	16
18	3 décembre	16
19	19 décembre	16

- lame d'eau moyenne perdue par percolation : 117 mm
- différence de stock d'eau dans le sol : 191 mm.

A partir des valeurs des doses nettes infiltrées par quart de raie (tableau 9), le logiciel SEPI permet d'évaluer l'hétérogénéité du taux de satisfaction des besoins en eau de la culture sur la parcelle (figure 5).

## Conclusions et perspectives

Jusqu'à présent le logiciel SEPI a essentiellement été utilisé pour le dimensionnement d'avant-projets détaillés.

### Un modèle plus précis que le modèle agroclimatique

Sous réserve de calibrage du bilan hydrique, l'exemple ci-dessus tend à montrer qu'il pourrait être utilisé pour développer un outil de pilotage

des irrigations. Prenant en compte la dose nette appliquée et la durée moyenne par arrosage, il permet de déterminer avec plus de précision que les modèles purement agroclimatiques l'ordre de priorité des parcelles à irriguer et d'optimiser l'organisation des arrosages en déterminant les débits à utiliser en tête d'arroseur et leur durée de mise en eau. Cet aspect est très important dans la mesure où la faible efficience globale de l'irrigation est très souvent due à une efficience de distribution médiocre.

### Détermination de la dose nette

Une telle approche nécessite, pour chaque parcelle ou groupe de parcelles dont les performances d'irrigation pourront être considérées homogènes, de disposer des valeurs de la dose brute et de la dose nette relative aux conditions d'arrosage à savoir une fréquence, un débit donné d'arrosage et des caractéristiques

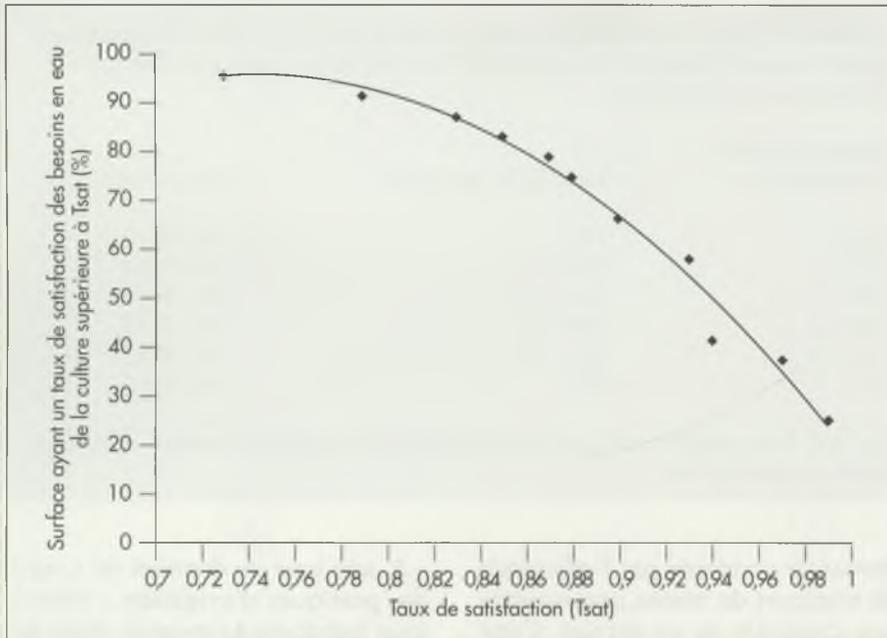


Figure 5. Représentation de la variabilité spatiale du taux de satisfaction des besoins en eau de la culture (rapports  $E_{tr}/E_{tm}$  calculés par le logiciel SEPI).

de parcelle (pente, longueur des raies). L'exemple ci-dessus démontre que seule la détermination de la dose nette pose un problème méthodologique du fait de sa variabilité. Une première analyse des essais d'irrigation réalisés sur le périmètre de Kenana a mis en évidence que déterminer des lois d'avancement et d'infiltration moyennes représentatives du fonctionnement de l'irrigation sur une parcelle gomme l'hétérogénéité du fonctionnement des raies. Sous réserve de s'assurer de la validité statistique des ajustements des lois d'avancement et d'infiltration, l'alternative proposée est d'intégrer la diversité des doses infiltrées sur un groupe homogène de raies en prenant pour valeur de la dose nette infiltrée celle ayant 75 % de chance d'être dépassée. On constatera que la distribution des doses infiltrées suit une loi normale (figure 6).

### Les informations nécessaires au fonctionnement de SEPI

L'utilisation de SEPI pour améliorer le pilotage des irrigations implique de développer une base de données

permettant, pour chaque parcelle, de disposer des informations nécessaires à la fois à l'évaluation des pratiques et à l'élaboration de recommandations. Ceci nécessitera d'avoir acquis des données descriptives des performances pour un large panel de niveaux d'humectation du sol (ou de durées depuis l'arrosage précédent ou la dernière pluie). Ces valeurs devront varier entre la durée maxi-

mum entre deux arrosages (qui pourra être déterminée par le module de bilan hydrique de SEPI) et celle correspondant à la moitié du tour d'eau. En effet, après une forte pluie ayant permis de ramener l'ensemble des parcelles à la capacité au champ, il sera nécessaire pour rééquilibrer le planning des irrigations de recommencer les arrosages dès que la moitié de la réserve facilement utilisable du sol aura été consommée par la culture (tableau 11) en modulant les doses brutes pour prendre en compte les contraintes liées au débit d'équipement.

A l'aide des données caractéristiques des performances de l'irrigation pour une fréquence donnée, on déterminera, en cas de rattrapage, le débit en tête de raie permettant d'appliquer la dose nette la plus proche possible de celle nécessaire pour rééquilibrer le calendrier des irrigations. Cela amènera dans la plupart des cas à recommander une augmentation du débit en diminuant le nombre de siphons utilisés en même temps (en vérifiant que la charge hydraulique nécessaire est compatible avec les caractéristiques de l'arroiseur) ou à proposer soit de choisir un diamètre de siphon plus adapté parmi ceux qui sont dispo-

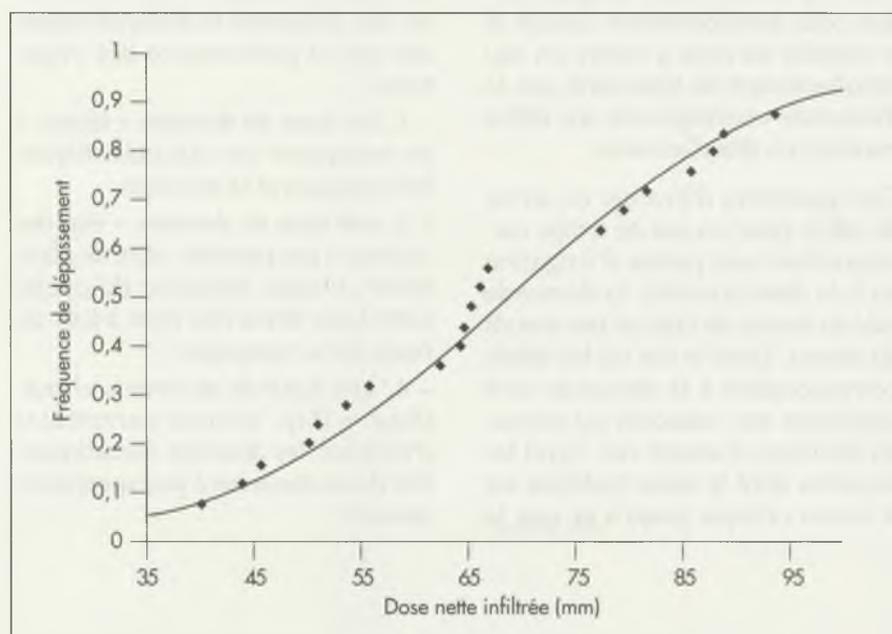


Figure 6. Ajustement de la fréquence de dépassement des doses infiltrées sur les quarts de raie à une loi normale.



nibles soit d'utiliser deux siphons sur une même raie.

## Améliorer les performances de l'irrigation

D'une façon plus générale, améliorer conjointement les performances de l'exploitation du réseau et celles de l'irrigation à la parcelle, nécessitera d'améliorer l'adéquation entre offre et demande en eau. Ceci demande de développer une méthodologie spécifique (LEGOUPIL et LIDON, 1994) dans la mesure où les tours d'eau moyens doivent être modulés en fonction des spécificités de la culture en place et de la parcelle.

Une telle démarche peut être développée à partir du modèle SEPI. Après avoir identifié, grâce au module de bilan hydrique, les parcelles dont le statut hydrique est le plus critique, il est possible de déterminer, en fonction de la durée depuis la dernière irrigation, le débit du siphon permettant d'appliquer une dose nette proche du déficit évalué par le bilan hydrique, le cas échéant le type de siphon à utiliser pour que son débit soit dans les conditions moyennes de fonctionnement du même ordre de grandeur que celui précédemment calculé et le nombre de raies à mettre en eau simultanément de telle sorte que la demande corresponde au débit maximal en tête d'arroseur.

Ceci permettra d'évaluer en terme de débit, pour un pas de temps correspondant aux postes d'irrigation ou à la demi-journée, la demande aval au niveau de chacun des nœuds du réseau. Dans le cas où les débits correspondant à la demande sont supérieurs aux capacités du réseau, on éliminera d'amont vers l'aval les parcelles dont le statut hydrique est le moins critique jusqu'à ce que la

Tableau 11. Doses brutes et durée depuis la pluie dans le cas d'une précipitation ayant ramenée l'ensemble des parcelles à la capacité au champ (cas d'un tour d'eau ayant une valeur paire).

Durée depuis la dernière pluie	Dose brute appliquée	Surface arrosée
Tr/2	Db/2	St / Tr / 2
Tr/2 + 1	Db/2 (Tr/2 + 1) / Tr	St / Tr / 2
Tr/2 + 1	Db/2 (Tr/2 - 1) / Tr	St / Tr / 2
Tr/2 + i	Db/2 (Tr/2 + i) / Tr	St / Tr / 2
Tr/2 + i	Db/2 (Tr/2 - i) / Tr	St / Tr / 2
Tr	Db	St / Tr / 2

Tr, tour d'eau en jours ; Db, dose brute moyenne en période de pointe ; St, surface totale irrigable en ha.

demande pondérée par l'efficience de transport du réseau corresponde aux capacités de ce dernier. Cette démarche est applicable telle quelle, pour les systèmes hydrauliques ne présentant pas de temps de réponse important. Dans le cas contraire il sera nécessaire de prendre en compte l'hydraulicité des ouvrages (BAUME *et al.*, 1993 ; KOSUTH *et al.*, 1992).

La mise en œuvre d'une telle démarche nécessite de développer au niveau du périmètre un système d'information comprenant :

- 1. une base de données « descriptive des caractéristiques physiques de la parcelle » : longueur, pente, arroseur en assurant l'alimentation en eau, propriétés hydrodynamiques des sols et performance des irrigations ;
- 2. une base de données « réseau » en indiquant les caractéristiques hydrauliques et la structure ;
- 3. une base de données « état des cultures » par parcelle : date de plantation, coupe, longueur du cycle. Cette base devra être mise à jour au cours de la campagne ;
- 4. une base de donnée « climatique » (Etp, pluies) permettant d'archiver les données climatiques. Elle devra être mise à jour quotidiennement ;

- 5. une base de données de « suivi des pratiques d'irrigation » mise à jour hebdomadairement (date de début et fin d'irrigation des parcelles, type de siphon utilisé, durée des irrigations) ;

- 6. un module « d'évaluation des pratiques d'irrigation à la parcelle » et d'estimation de son statut hydrique. Ce module sera renseigné à partir des informations fournies par les bases de données « caractéristiques physiques de la parcelle », « état des cultures », « climatique » et « suivi des pratiques d'irrigation » ;

- 7. un module « d'élaboration de recommandations » renseigné à partir des informations fournies par la base de données « réseau » et par le module « évaluation des pratiques d'irrigation ».

Il y a quelques années un tel outil aurait nécessité de développer un logiciel spécifique et de se doter d'équipements informatiques hautement performants. Aujourd'hui, l'arrivée sur le marché grand public de logiciels de base de données de grande capacité interfaçables avec des logiciels de calcul ainsi que l'augmentation des capacités des ordinateurs permettrait de développer un tel outil pour un coût limité tout en assurant son opérationnalité.

## Références bibliographiques

BAUME J.-P., SALLY H., MALATERRE P.O., REY J., 1993. Development and field installation of a mathematical simulation model in support of irrigation canal management. IIMI and CEMAGREF Research paper.

BERTHOME P., MAILHOL J.-C., RENAULT D., 1989. Choix des paramètres d'arrosage en irrigation à la raie. Colloque sur les méthodes d'irrigation à la raie pour préserver et protéger les ressources en eau, Avignon Cemagref, France. 11 p.

CAMPAORE M.L., PEREIRA L.S., DE SOUSA P.L., TIERCELIN J.R., PENADILLE Y., 1998. Irrigation à la parcelle. *In* traité de l'irrigation, J.-C. Tiercelin (coordonnateur). Ed Lavoisier Tec & Doc, Paris, France, p. 429-542.

DOORENBOS J., KASSAM A.H., 1987. Réponse des rendements à l'eau Bull FAO Irrigation & Drainage n° 33.

KOSUTH P., REY J., MALATERRE P.O., 1992. Actes du colloque Application of mathematical modeling for improvement of irrigation canal operation. Montpellier 26-30 octobre 1992. Cemagref Montpellier, France.

LEGOUPIL J.-C., LIDON B., 1994. Proposition d'amélioration de la gestion de l'eau sur le périmètre irrigué de la CSS. Elaboration d'un système de suivi et de recommandations. Rapport de mission du 5 au 10 octobre 1994 à la CSS. 51 p. Cirad, France.

LIDON B., 1996. Consultant report in irrigation management at Kenana Sugar Company Sudan 22 p. Cirad, France.

MAILHOL J.-C., 1992. Un modèle pour améliorer la conduite de l'irrigation à la raie. ICID Bulletin 41 (1) : 43-60.

MAILHOL J.-C., GONZALEZ G., 1993. Furrow irrigation model for real time

applications in cracking soils. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 119 (5) : 768-793.

MAILHOL J.-C., BAGRI H., LACHAB M., 1997. Operative irrigations furrow modelling for real-time applications on close-end furrows. *Irrig. Drain. Syst.* 11, 347-366.

MARLET S., CLOPES A., LIDON B., MARAUX F., 1996. SEPI : systèmes d'évaluation et de planification des performances des irrigation gravitaires. *In* ICID workshop on crop water environment models, 17 septembre 1996, Le Caire, Egypte. p.267-287.

RAES D, GULLENTOPS M., VAN DEN BULKE, FEYDEN J., 1988. Planning irrigation schedules by means of the IRSIS software package. A case study : Chateau Porcien. 15th European Regional Conference on Agricultural Water Management, Dubrovnick, Yougoslavie.

SENE A., 1999. La gestion de la salinité des terres sous culture irriguée de canne à sucre à Richard-Toll, Sénégal. *Agriculture et Développement*, 24 : 56-59.

## Résumé...Abstract...Resumen

B. LIDON, S. MARLET, A. CLOPES — **Evaluation des performances des arrosages de la canne à sucre irriguée à la raie.**

Le modèle SEPI, Système d'évaluation et de planification des irrigations, intègre un module classique d'estimation des besoins en eau d'irrigation par calcul du bilan hydrique et un module de caractérisation du fonctionnement de l'irrigation à la raie. Il permet de mettre en relation la fréquence d'arrosage, le débit d'eau en tête de raie, la longueur de la raie, la pente de la raie et la durée d'arrosage. La meilleure combinaison de ces facteurs est recherchée afin que la dose infiltrée le long de la raie soit proche des besoins nets en irrigation de la culture et la plus uniforme possible avec un minimum de pertes en colature et par percolation. La spécificité du modèle SEPI est de donner les doses infiltrées par quart de raie, ce qui permet de tester l'uniformité de l'irrigation. Les données obtenues sur le périmètre sucrier de Kenana, Soudan, illustrent les possibilités du modèle. Si les caractéristiques générales du réseau hydraulique amenaient initialement à proposer un tour d'eau de douze jours, l'évaluation des performances de l'irrigation fondée sur l'étude du fonctionnement d'un échantillon de raies a permis d'allonger le tour d'eau à seize jours.

Mots-clés : irrigation à la raie, bilan hydrique, Soudan, canne à sucre, irrigation, SEPI.

B. LIDON, S. MARLET, A. CLOPES — **Evaluating the performance of sugarcane row irrigation.**

The SEPI model (irrigation evaluation and planning system) integrates a conventional irrigation water requirement estimation module based on a water balance calculation, and a module that characterizes row irrigation functioning. It covers watering frequency, flow rate at the head of the row, row length, row slope and watering duration. The best combination of these different factors is sought, to ensure that the dose infiltrated along the row is close to the net irrigation requirements of the crop, and as uniform as possible, with minimum losses as surplus water and by percolation. The specificity of the SEPI model is that it gives the infiltrated doses per quarter-row, which can be used to test irrigation uniformity. The data obtained in the Kenana sugar growing area, Sudan, show the possibilities of the model. While the overall characteristics of the network initially suggested a 12-day cycle, an evaluation of irrigation performance based on a study of a sample of rows led to the cycle being extended to 16 days.

Keywords: row irrigation, water balance, Sudan, sugarcane, irrigation, SEPI

B. LIDON, S. MARLET, A. CLOPES — **Evaluación de desempeños de la irrigación de la caña de azúcar regada en surco.**

El modelo SEPI (Sistema de Evaluación y Planificación de Irrigaciones) integra un módulo clásico de estimación de los requerimientos hídricos de irrigación mediante el cálculo del balance hídrico y un módulo de caracterización del funcionamiento del riego en surco. Permite relacionar la frecuencia de riego, caudal de agua en extremo de surco, longitud de surco, pendiente de surco y duración del riego. Se busca la mejor combinación de estos factores para que la dosis infiltrada a lo largo del surco esté próxima de los requerimientos netos de riego del cultivo y sea lo más uniformemente posible con un mínimo de pérdidas de coladura y percolación. La especificidad del modelo SEPI consiste en dar las dosis infiltradas por cuarto de surco, lo que permite probar la uniformidad del riego. Los datos obtenidos en el área azucarera de Kenana (Sudán) ilustran las posibilidades del modelo. Si las características generales de la red hidráulica llevaban inicialmente a proponer un turno de riego de doce días, la evaluación del desempeño del riego basado en el estudio del funcionamiento de una muestra de surcos ha permitido prolongar el turno de riego a dieciséis días.

Palabras clave: riego en surco, balance hídrico, Sudán, caña de azúcar, riego, SEPI.