



L'évaluation des besoins en eau de la canne



Arrosage basse pression sur repousse (Sosuco). (© Cirad).

L'alimentation naturelle en eau n'est pas toujours satisfaisante pour l'expression du potentiel de production de la canne. Si la différence de rendement entre les cultures de canne pluviale et de canne irriguée montre l'intérêt de l'irrigation et permet le calcul de son efficacité, dès l'initiation du projet de culture les besoins de la canne doivent être déterminés : notamment les volumes d'eau nécessaires et leur calendrier d'apport. Cette démarche comprend la mesure des différents termes du bilan hydrique tout au long du cycle et conduit à utiliser les coefficients culturaux, fondements de la méthode climatique. Dans cette méthode, la canne est placée de façon optimale du point de vue hydrique : l'évapotranspiration réelle (Etr) est égale à l'évapotranspiration maximale (Etm), et le besoin en eau est calculé par rapport à une référence d'évaporation ou bien par rapport à l'évapotranspiration poten-

tielle (Etp). D'autres approches, fondées sur un suivi de l'état hydrique de la plante ou du sol, permettent d'effectuer en temps réel l'adéquation entre la demande en eau de la plante et l'offre par des arrosages en complément des pluies. Ces méthodes permettent aussi bien d'évaluer le besoin en eau que de piloter l'irrigation. Parmi celles-ci, la méthode tensiométrique vise le contrôle des mouvements de l'eau dans le sol tout en essayant d'assurer une évapotranspiration réelle assez proche de l'évapotranspiration maximale. L'emploi de la méthode climatique repose sur une évaluation de l'évapotranspiration, accompagnée par la mesure des termes du bilan hydrique de la culture. La méthode tensiométrique vise une simplification de ce bilan hydrique. Ces différents aspects vont être développés avant que soit discuté le champ d'application des deux méthodes.

R. GAUDIN

Cirad-ca, avenue Agropolis,
34398 Montpellier Cedex 5, France
gaudin@ensam.inra.fr

Les progrès accomplis dans la prévision des besoins en eau

L'évolution des méthodes d'évaluation des besoins en eau est visualisée sur la figure 1.

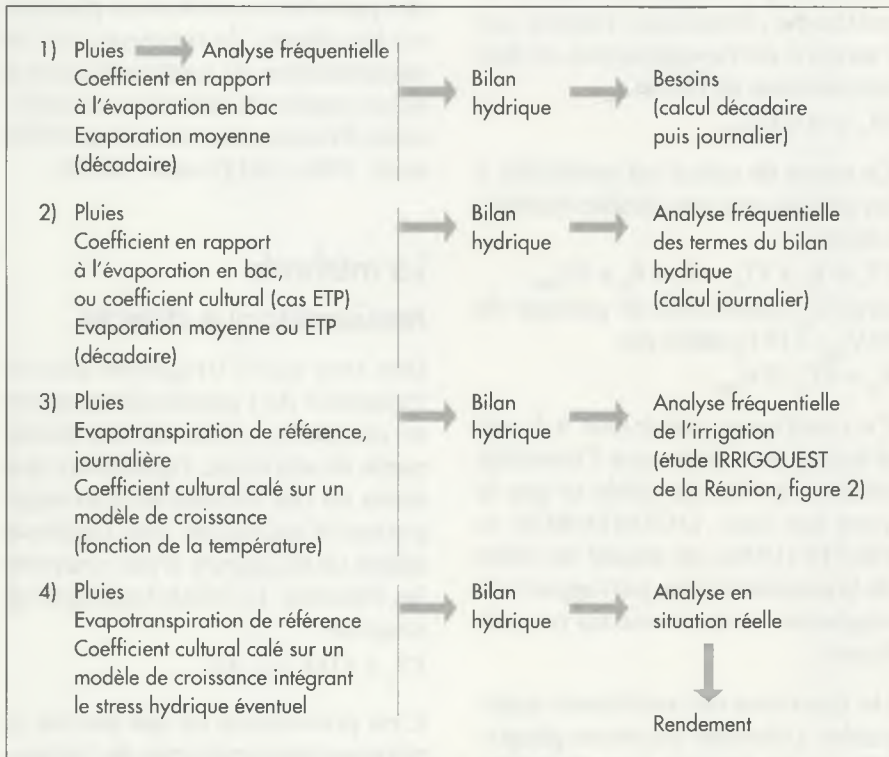


Figure 1. Historique de méthodes d'évaluation des besoins en eau.

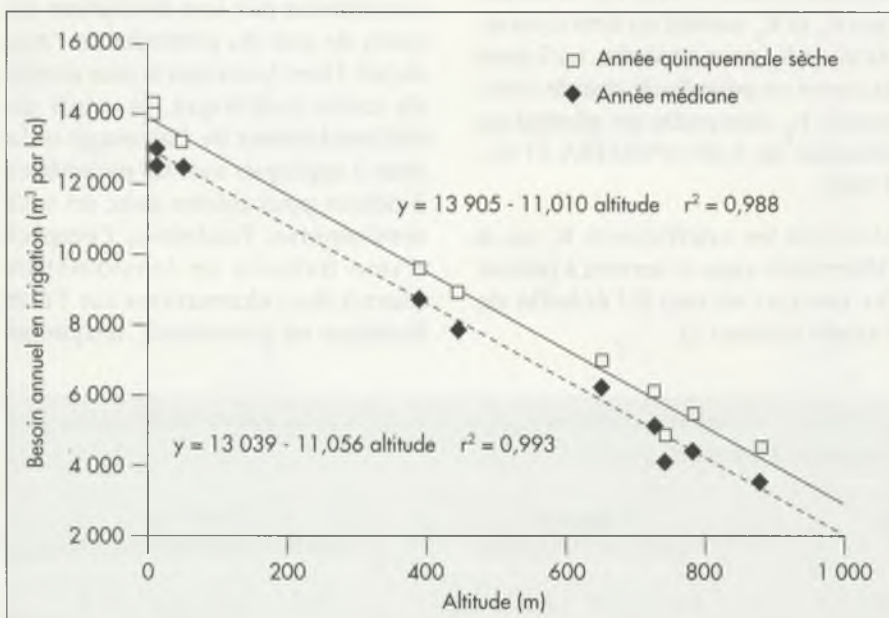


Figure 2. Les besoins en eau d'irrigation de la canne dans la zone Ouest de l'île de la Réunion (POSER, sous presse).

La méthode de l'analyse fréquentielle a d'abord été appliquée aux pluies. Les installations d'irrigation ont été prévues pour satisfaire les besoins en eau en année quinquennale sèche. Les précipitations de cette année quinquennale sèche sont dépassées par celles des autres années avec une fréquence de 80 %.

Avec les progrès de l'informatique, l'analyse fréquentielle a été appliquée aux termes du bilan hydrique et au besoin en eau d'irrigation. La base de calcul de l'évapotranspiration de référence est aussi mieux définie. La dernière étape de cette évolution sera l'analyse de la situation réelle, avec prévision du rendement grâce à un modèle de croissance articulé au bilan hydrique de la culture, puis en intégrant les phases de stress hydrique dans les cas où l'arrosage est insuffisant ou inexistant.

Les méthodes climatique et tensiométrique

La méthode climatique prédictive

Dans cette méthode, l'évapotranspiration de la culture, ET_c , est mise en relation avec l'évapotranspiration de référence, ET_0 , par l'intermédiaire d'un coefficient cultural K_c :

$$ET_c = K_c \times ET_0$$

La référence est le gazon dont l'évapotranspiration calculée est utilisée comme index de la demande climatique d'évaporation. Le coefficient K_c varie essentiellement avec les caractéristiques de la culture mais la date de plantation (de coupe) et le type d'irrigation sont aussi des facteurs qui entrent en ligne de compte.

Les coefficients K_c sont déterminés pour les différents stades de la culture. Le stock d'eau du sol est maintenu dans des limites telles que les besoins en eau de la canne soient pleinement satisfaits. Il s'agit en fait de gérer un bilan hydrique en maintenant l'humidité du sol au niveau



de la réserve facilement utilisable (RFU). Le bilan hydrique s'écrit alors :

$$ET_c = ETM = P + I - R - D - \Delta S = K_c \times ET_0$$

avec : P, pluies ; I, irrigation ; R, ruissellement ; D, drainage ; ΔS , variation de stock d'eau du sol (stock final - stock initial) ;

$$\text{ou } ET_c = ETM = P + I - R + RC - \Delta S$$

avec RC, remontées capillaires.

Ce bilan peut être établi si le ruissellement est connu ainsi que le drainage ou les remontées capillaires.

Une étape essentielle et délicate est le choix de la profondeur où sont évalués les flux profonds. C'est aussi la profondeur qui délimite le volume de sol pour lequel est évalué le stock hydrique. Cette cote est choisie en dessous des racines actives les plus profondes. Il arrive que sur un profil coexistent un mouvement ascendant de l'eau vers la surface et un mouvement descendant de l'eau en profondeur. La cote où l'eau est immobile détermine la position du plan de flux nul. Celle-ci peut être déterminée par une mesure tensiométrique. Cette situation est alors privilégiée pour établir le bilan. Le plus souvent, il est possible de considérer une profondeur où les percolations sont négligeables. Dans la pratique, cela correspond à de faibles valeurs de la conductivité hydraulique associée à des valeurs élevées de la succion. Si cela n'est pas plausible, des mesures tensio-humidimétriques de profondeur et la caractérisation hydrodynamique du sol permettent d'expliquer la loi de Darcy⁽¹⁾. Le stock d'eau du sol, S, est déterminé par la méthode de réflectométrie temporelle (TDR) ou encore par la sonde à neutrons.

Le maintien de l'humidité du sol au niveau de la RFU pour la zone de prélèvement racinaire est la condition la plus difficile à respecter. La décision d'irriguer est prise dès que l'humidité, mesurée à la sonde (ou

par un autre moyen), s'approche de la limite inférieure de la RFU.

L'emploi de la méthode climatique conduit donc à un tableau de coefficients K_c , comme par exemple les résultats obtenus par DEVANNE (1990) pour le périmètre irrigué de Cilaos à la Réunion (tableau 1).

Lorsque l'évapotranspiration de référence (ET_0) n'est pas accessible, la méthode climatique repose sur l'emploi de l'évaporation en bac comme base de calcul :

$$ET_c = \alpha \times EV_{bac}$$

Ce mode de calcul est préférable à un passage par une double multiplication :

$$ET_c = K_c \times ET_0 = K_c \times K_p \times EV_{bac}$$

avec K_p , coefficient de passage de l' EV_{bac} à l' ET_0 défini par $K_p = ET_0 / EV_{bac}$.

Ce coefficient, inférieur à 1, est d'autant plus faible que l'humidité relative de l'air est faible et que le vent est fort. DOORENBOS et PRUITT (1976) ont étudié les effets de la position du bac par rapport à la végétation environnante sur ce coefficient.

Un répertoire de coefficients applicables à diverses situations géographiques est présenté dans CHAROY *et al.* (1978). Ce coefficient ne dépasse jamais 1. Ceci est lié au fait que K_c et K_p varient en sens inverse. Ainsi, si K_c peut atteindre 1,25 pour la canne en période de grande croissance, K_p descendra en général au dessous de 0,80 (PEREIRA *et al.*, 1998).

Une fois les coefficients K_c ou α déterminés, ceux-ci servent à prévoir les besoins en eau à l'échelle de l'année (tableau 2).

La canne est sevrée un mois et demi avant la récolte. Cette pratique permet de restreindre l'alimentation en eau de la plante à l'approche de la coupe. L'eau difficilement utilisable de la réserve du sol est sollicitée, ce qui induit le phénomène de maturation de la canne (LANGELLIER, 1980).

Une voie d'amélioration pour prendre en compte les besoins en eau des parcelles nouvellement plantées ou les débuts de repousse, est la décomposition du coefficient cultural en un coefficient de base et un coefficient d'évaporation du sol nu (ITIER *et al.*, 1996 ; ALLEN *et al.*, 1998).

La méthode tensiométrique directe

Dès lors que l'irrigation assure l'essentiel de l'approvisionnement en eau de la culture sur une bonne partie de son cycle, l'ajustement des doses ou des fréquences d'arrosage permet d'approcher une situation idéale où les apports d'eau couvrent les besoins. Le bilan hydrique se simplifie :

$$ET_c = ETM = I - \Delta S$$

C'est précisément ce que permet le pilotage tensiométrique de l'irrigation. Cette pratique assez ancienne (RICHARDS et MARSH, 1961) se caractérise par une évolution en dents de scie du potentiel de l'eau du sol. Dans la version la plus simple de cette technique, le seuil de déclenchement de l'arrosage et la dose à appliquer sont les paramètres à définir pour piloter avec un seul tensiomètre. Toutefois, l'emploi d'une batterie de tensiomètres fournit des informations sur l'état hydrique en profondeur, lesquelles

Tableau 1. Coefficients culturaux K_c pour la canne à sucre (périmètre de Cilaos, Réunion) (DEVANNE, 1990).

	Coupe en août et en septembre				Coupe en octobre, novembre, décembre			
	0,5	0,8	1,1	0,8	0,5	0,8	1,1	0,8
K_c	0,5	0,8	1,1	0,8	0,5	0,8	1,1	0,8
Durée de la période (mois)	2	1	6	3	2	1	5	4

1. Loi de Darcy généralisée aux milieux non saturés, ou loi de Buckingham (RICHARDS, 1960).

Tableau 2. Besoins en eau nets moyens pour une coupe au 15 mai (début de campagne) sur le périmètre d'Analaiva, plaine de Morondava, Madagascar (BARAN, 1982). Irrigation par aspersion.

Mois	mai (1/2)	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	jan.	fév.	mars	avril	mai (1/2)	total
EV _{bac}	83	153	163	192	227	289	317	274	233	196	212	184	83	2 606
Coefficient	0,5	0,5	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	0,7	0	0	-
Besoins (mm)	41	76	114	134	204	260	285	274	233	196	148	0	0	1 965
Pluies (mm)	-	-	-	-	-	22	40	135	276	196	103	-	-	772
Irrigation (mm)	41	76	114	134	204	238	245	139	-	-	45	-	-	1 236

peuvent être mises en relation avec le développement de la plante. Par exemple, l'arrivée de la saison des pluies en cours de cycle amène une recharge sur tout le profil ; une adaptation du code de pilotage dans cette période charnière peut permettre de préparer une inversion des flux hydriques qui sera très profitable en période de maturation.

Les points importants de la méthode tensiométrique sont les suivants :

- quel seuil retenir ?
- où placer la batterie déclencheuse et à quelle profondeur ?
- combien de batteries utiliser ?

Des éléments de réponse sont donnés à partir de l'expérience acquise sur le périmètre sucrier d'Analaiva (ORIOU *et al.*, 1995 ; GAUDIN *et al.*, 1990, 1998). La situation de sols profonds à texture limono-sableuse homogène, l'arrosage par rampe pivotante non limité par la disponibilité en eau, la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques des sols étaient propices à l'étude de la dynamique de l'eau sous canne (RAPANOELINA *et al.*, 1999).

Le seuil de succion, qui va servir au déclenchement de l'arrosage, doit être assez élevé pour que le sol reste sec en profondeur avant les pluies ; cependant, il doit préserver une marge de manœuvre pour l'irrigant, c'est-à-dire que le tensiomètre doit rester fonctionnel un ou deux jours après passage du seuil, même si aucun arrosage n'est pratiqué. La limite de décrochage se situant vers 900 hPa (hectopascals), un bon compromis est obtenu de 500 à 600 hPa. Dans la plage de fonctionnement alors imposée (50 à 100 hPa après arrosage, 500 à

650 hPa juste avant l'arrosage), l'évolution du potentiel hydrique montre que la consommation en eau de la canne est constante au cours du temps (figure 3). Au-delà du seuil, le relevé de potentiel montre un point d'inflexion qui semble indiquer un passage dans le domaine de la réserve difficilement utilisable, puisque la plante est amenée à consommer moins d'eau par unité de temps, au moins dans la zone prospectée par la mesure tensiométrique. Le dépassement du

point d'inflexion indiquerait peut-être une sollicitation de la réserve en eau des horizons plus profonds, cette réserve étant toutefois très limitée. Au cours de ce phénomène de mini-stress, la photosynthèse de la canne se poursuit et la croissance n'est pas pénalisée sur le long terme. Globalement, l'effet serait doublement bénéfique : économie de l'eau, enracinement.

La position de la batterie déclencheuse adoptée dans l'étude est une verticale distante de 25 à 30 cm de



Station automatique de Bras de la plaine (Réunion). (© Cirad)

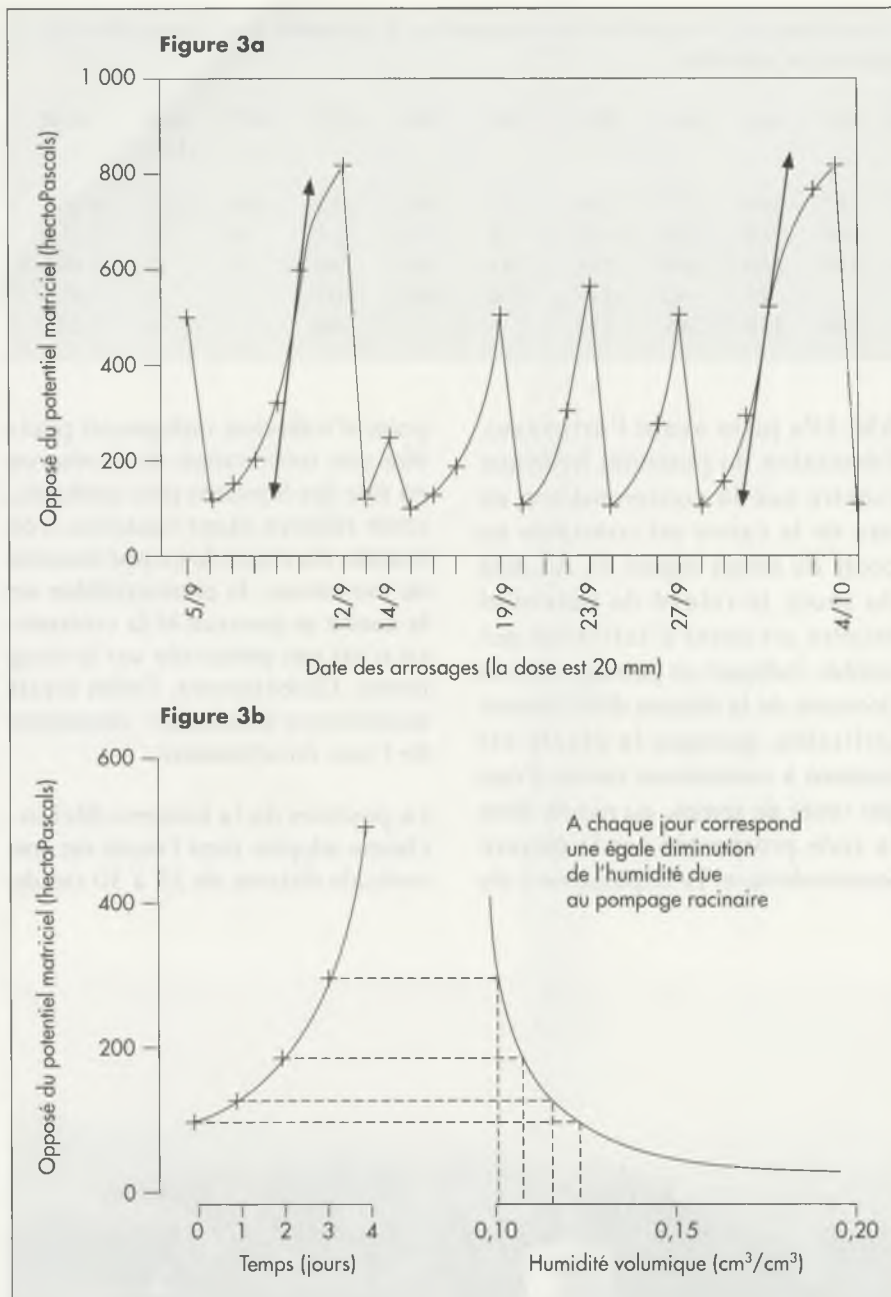


Figure 3. Evolution du potentiel hydrique mesuré par le tensiomètre. Evolution caractéristique en dents de scies (courbe a) en fonction de la date des arrosages. La montée de la succion observée à chaque cycle traduit un déplacement sur la courbe caractéristique de l'humidité du sol (courbe b), avec une consommation en eau constante, tant que le point d'inflexion n'est pas franchi (GAUDIN *et al.*, 1998).

la ligne de canne. C'est une localisation privilégiée car, juste après arrosage, cette zone d'interrang est la plus humide en raison de l'effet d'entonnoir des touffes de cannes. Etant assez proche de la ligne, cette zone enregistre aussi l'effet du prélèvement racinaire. Le tensiomètre déclencheur est placé à 25 cm de profondeur, au cours de la phase de reprise de végétation (levée-tallage) ;

le tensiomètre placé à 50 cm prend le relais en période de grande croissance.

Plusieurs batteries sont mises en place dans l'unité d'irrigation afin de prévenir un accident de végétation en eau. Les informations fournies par une batterie doivent être confirmées par une autre batterie. Le nombre

minimal de batteries à mettre en œuvre est donc deux.

Par cette méthode, les besoins nets en eau de la canne sont satisfaits en temps réel. Ils correspondent aux arrosages, pour la période hors saison des pluies. Le drainage est faible.

Les limites des deux méthodes

Les méthodes climatique et tensiométrique font chacune appel à un support, l'évaluation de l'évapotranspiration de référence et de la réserve utile pour la première, la connaissance des propriétés hydrodynamiques du sol pour la seconde. Ce dernier support permet d'élaborer le code de pilotage tensiométrique. Plus la circulation de l'eau est aisée dans le sol, et plus l'utilisation du dispositif d'irrigation peut être souple, plus le code est facile à élaborer. Dans les situations où le sol a un fonctionnement hydrodynamique compliqué (superposition d'horizons de texture différente, hétérogénéité latérale, etc.), le pilotage tensiométrique sera difficile à assurer convenablement car les mesures tensiométriques devront être multipliées et la recherche du bon code risque de s'avérer infructueuse. Dans ce cas, la méthode climatique reste bien sûr performante mais sa réussite va dépendre, entre autres, de la qualité de la mesure de la demande évaporative et du degré de pertinence avec lequel la notion de réserve utile et sa mesure décrivent la relation eau-sol-plante (COMBRES *et al.*, 1999 ; GAUDIN *et al.*, 1999).

L'évaluation de l'évapotranspiration

Les mesures lysimétriques

Le lysimètre est une cuve de dimensions déterminées où l'on cultive la canne. L'évapotranspiration du couvert (Et) se déduit de la mesure des termes du bilan hydrique :

$$Et = (P + I) - D - \Delta S.$$

Dans le cas le plus simple, le terme ΔS qui représente la variation du stock d'eau de la cuve est obtenu par pesée du dispositif (PERRIER *et al.*, 1974). Les autres termes (P , pluie, I , irrigation et D , drainage) sont mesurés. Le lysimètre à drainage est un dispositif moins coûteux que le lysimètre à pesée. Il peut éventuellement être maintenu à niveau d'eau constant grâce à un siphon au fond de la cuve.

Le lysimètre devait permettre d'accéder à l'Etm d'une culture, puisque l'humidité du sol peut être maintenue au voisinage de la capacité de rétention (ou capacité au champ) grâce à des arrosages successifs. Si la culture est un gazon bien entretenu en phase active de croissance, l'Et mesurée est par définition l'Etp.

De tels dispositifs ont été installés dans les années soixante sur les stations d'expérimentation en hydraulique agricole de Tarna (près de Maradi, Niger) et Mogtedo (près de Zorgo, Burkina-Faso) pour déterminer l'évapotranspiration de la canne à sucre. Les lysimètres d'une surface de 3 m² (1,50 m x 2 m) et d'une profondeur de 1 m étaient au centre de parcelles plus grandes cultivées à l'identique (63 à 176 m² pour la canne, 1 000 m² pour le gazon). Les expérimentateurs de l'époque ont souvent constaté (et essayé de corriger) une différence de croissance entre les cannes cultivées dans les cuves et celles poussant dans la surface de garde. Dans la situation de Mogtedo (canne de 14 mois coupée fin janvier), les tonnages étaient 100,1 t/ha dans les cuves et 137,6 t/ha à l'extérieur (IRAT, 1969).

En terme de consommation en eau et d'évapotranspiration, l'inégalité suivante s'applique pour la deuxième moitié du cycle, à partir de la phase de grande croissance (7 mois) :

$$E_{tm} > E_{v_{Bac}} > E_{t_0} (= E_{tp}).$$

Le gazon de référence est *Paspalum notatum* ou *Digitaria decumbens*. Les besoins en eau de la canne dépassent de 40 % ceux du gazon au *boom-stage*.

Les critiques formulées à l'encontre des lysimètres sont souvent les suivantes :

- effet « pot de fleur » et consommation de luxe, qui peuvent se traduire par une verse de la canne ;
- difficulté à obtenir les mêmes couverts et enracinements dans la cuve et à l'extérieur.

Dans le cas de cannes assez hautes (dès 6 mois), l'advection locale d'air sec (déficit de saturation de l'air élevé) peut aussi jouer un grand rôle et expliquer que l'Etm mesurée sur de tels dispositifs dépasse l'Etp, car le gazon, ou une surface plane évaporative, sera moins affecté par l'advection que la canne (BISWAS, 1988). Le facteur advection est pris en compte dans le cadre du choix de la référence évaporative utilisée dans la méthode climatique.

L'évapotranspiration de référence et le bilan d'énergie

L'obtention de données climatologiques est indispensable pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle. Dans la formule de Penman (1948), deux facteurs principaux apparaissent : le rayonnement net, R_n (en Joules / cm². jour) et le pouvoir évaporant de l'air, E_a (en mm /

jour). GÈNERE (1985, 1990) utilise pour le calcul de R_n et de E_a les paramètres suivants : le rayonnement solaire global, l'albédo de la surface, la température de l'air sous abri, la tension réelle de la vapeur d'eau sous abri, la fraction d'insolation et la vitesse du vent à 2 mètres du sol. L'acquisition et le traitement des données peuvent être automatisés, comme c'est le cas avec le réseau de stations CIMEL à la Réunion.

L'évapotranspiration potentielle, calculée selon la formule de Penman ou par d'autres moyens (formule de Blaney-Criddle ou formule simplifiée fondée sur le rayonnement), est une évapotranspiration de référence. Elle est largement dépassée par l'évapotranspiration de la culture quand celle-ci couvre complètement le sol. En d'autres termes le coefficient cultural dépasse 1 (tableau 3).

Trois facteurs expliquent que le coefficient cultural dépasse 1 :

- la surface évaporante de la canne est beaucoup plus importante que celle d'un gazon. En repousse, le sol est recouvert par les feuilles quelques mois après la coupe ;
- l'effet du vent sera plus important sur la canne que sur le gazon ;
- le dernier facteur est lié à la physiologie de la canne. En période de *boom-stage*, sa croissance peut

Tableau 3. Valeurs moyennes du coefficient cultural K_c retenues en fonction de la période de coupe sur le périmètre de Banfora, Burkina-Faso (MONTENY, 1991).

	Couverture totale toute l'année	Canne coupée en novembre	Canne coupée en mars
Janvier	1,1	0,4	1,1
Février	1,1	0,8	1,1
Mars	1,15	1,0	-
Avril	1,2	1,2	0,4
Mai	1,25	1,25	0,8
Juin	1,1	1,1	1,1
Juillet	1,1	1,1	1,1
Août	1,1	1,1	1,1
Septembre	1,1	1,1	1,1
Octobre	1,2	1,2	1,2
Novembre	1,4	-	1,4
Décembre	1,2	0,3	1,2



atteindre des pointes de 3 cm / jour. L'activité photosynthétique qui soutient cette montée est forcément accompagnée d'une forte transpiration.

Le coefficient cultural est en fait variable à un pas de temps plus court que celui habituellement retenu pour l'évaluation des besoins (le mois dans les tableaux précédents), notamment en zone soudano-sahélienne où pendant les journées d'harmattan, le bilan d'énergie de la culture est augmenté d'un terme d'advection conséquent. MONTENY (1991) a bien mis en évidence ce phénomène sur le périmètre sucrier de Banfora en mesurant le rapport de Bowen sur une parcelle de 25 ha située au cœur d'une zone irriguée de 1 200 ha. Ce rapport est la quantité d'énergie utilisée pour la vaporisation de l'eau rapportée au rayonnement net reçu par la culture. Pour une journée représentative de la période chaude et sèche (novembre à mi-décembre), ce rapport vaut 1,37 (Rn = 11,9 MégaJoule / m². jour ; Vaporisation = 16,3 MJ / m². jour), alors que pour la saison chaude et un peu humide (mi-février à avril) ce rapport vaut 0,89. Dans le premier cas, c'est le surplus d'énergie apporté par l'harmattan qui entraîne une très forte consommation de l'eau : de façon exceptionnelle, l'évapotranspiration de la culture peut dépasser 1,5 fois l'évapotranspiration de référence, ce qui confirme, malgré les critiques formulées à leur encontre, les données lysimétriques rapportées précédemment. Dans le second cas (rapport de Bowen inférieur à 1), la culture perd une partie de son énergie sous la forme de chaleur sensible. En saison froide et sèche, on enregistre une baisse du rapport de Bowen jusqu'à 0,78, due selon MONTENY (1991) à un refroidissement nocturne : la baisse de la température du sol serait préjudiciable à une bonne absorption de l'eau.

L'évapotranspiration de référence et l'évaporation en bac

En l'absence de mesure des paramètres de l'évapotranspiration de référence, l'évaporation du bac de classe A est adoptée pour caler le bilan hydrique de la méthode climatique. Simple à première vue, la mise en œuvre de cette mesure sur le bac suppose néanmoins le respect de normes concernant son emplacement par rapport aux champs de canne, ses dimensions, sa hauteur par rapport au sol, le niveau d'eau, et l'entretien.

La relation entre l'Etp et l'évaporation du bac n'est pas unique. Elle évolue au cours de l'année, notamment quand le vent devient un élément important du climat. La bande sahélienne offre d'excellentes illustrations de ce processus (figure 4). Cette problématique du vent se retrouve lorsque sont évaluées l'efficacité et l'uniformité de l'irrigation par aspersion (DUC, 1973).

Dans la mesure où l'évaporation bac intègre mieux que l'Etp (parfois à cause du mode de calcul de cette dernière, ou en raison de données climatiques partielles) une partie de la composante d'advection du bilan d'énergie, elle a souvent été retenue comme une approche de l'évapotranspiration maximale de la culture (CHARROY *et al.*, 1978). Cependant, l'utilisation de cette procédure est soumise à deux limitations :
– d'un point de vue théorique, l'évapotranspiration maximale peut

dépasser l'évaporation en bac, notamment au cours de la phase de *boom stage* si tous les autres facteurs de production sont à l'optimum ;
– d'un point de vue pratique, le bac n'est pas forcément idéalement placé dans le site.

Le recours à l'évapotranspiration de référence (ALLEN *et al.*, 1998) constitue certainement la meilleure réponse à cette double problématique.

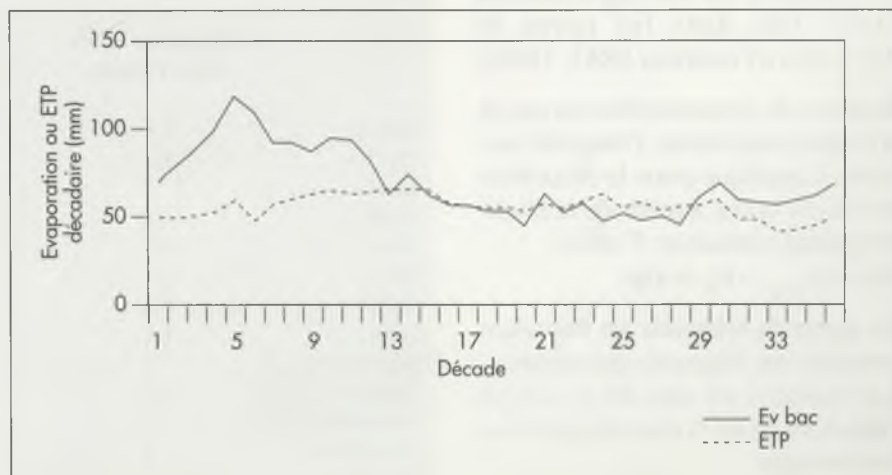
Les outils du bilan hydrique

Les tensiomètres

Le tensiomètre est un outil assez ancien (RICHARDS, 1949, 1960), qui mesure l'état énergétique de l'eau dans le sol, c'est-à-dire son potentiel matriciel. La partie sensible du dispositif est une bougie en céramique poreuse mise en contact avec le sol. Le trou d'installation est creusé avec une tarière d'un diamètre voisin de celui de la bougie (figure 5). La bougie remplie d'eau est liée à un système manométrique, par exemple une colonne de mercure ; Le système reste en place et nécessite une purge régulière avec de l'eau bouillie dégazée.

La mesure peut se faire jusqu'à une limite de potentiel où le tensiomètre « décroche ». En effet, c'est l'attraction du sol pour l'eau qui crée la dépression mesurée. Cette dépres-

Figure 4. Données bioclimatologiques de Banda, Tchad (FOREST, 1985).



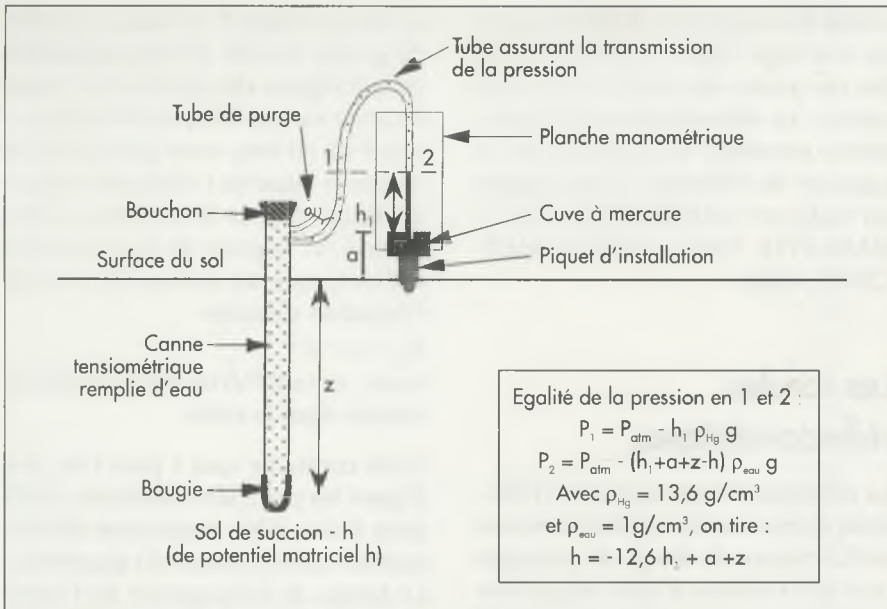


Figure 5. Mesure de la suction du sol avec un tensiomètre en place.

sion étant transmise par l'eau dans le dispositif, elle ne peut aller au-delà de la pression de vapeur d'eau saturante qui est dépendante de la température (74 hPa à 40 °C, 42 hPa à 30 °C). Pour une pression atmosphérique de 1 000 hPa par exemple, la limite de mesure est donc - 926 hPa à 40 °C et - 958 hPa à 30 °C. Ces valeurs sont décalées en zone d'altitude, car la pression est moindre. Cette limite n'est pas gênante en sols légers, car la plage de fonctionnement de l'appareil couvre alors plus de la moitié de l'intervalle d'humidité entre la capacité de rétention et le point de flétrissement permanent, voire près de 90 % en sables grossiers (RICHARDS, 1949). Cette bonne prise en compte de la réserve facilement utilisable confirme l'intérêt de l'emploi des tensiomètres pour le pilotage de l'irrigation.

Le tensiomètre est un appareil plutôt destiné à une utilisation en série qu'à un usage isolé. En effet, les mesures faites en deux points donnent accès au sens du mouvement de l'eau entre ces deux points. Le dispositif le plus couramment utilisé est une batterie de tensiomètres implantée sur un profil, avec autant de tensiomètres que le permet la planche manométrique (souvent cinq). La grandeur prise en compte pour sa variation dans l'espace n'est pas le

potentiel matriciel mais la charge hydraulique. Celle-ci se déduit du potentiel matriciel en ajoutant le potentiel gravitaire égal à l'opposé de la profondeur : $H = h - z$. Les pro-

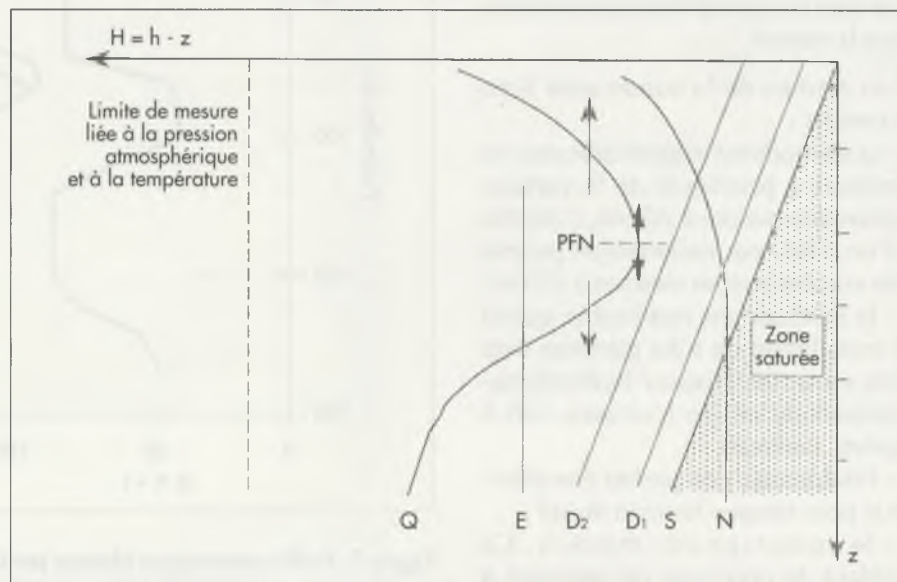
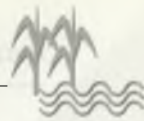


Figure 6. Profils tensiométriques typiques dans le cas d'un sol profond homogène. S : droite de saturation, correspond à la surface de la nappe, $h = 0$, $H = -z$ (bissectrice). N : profil influencé par une nappe, le niveau piézométrique est donné par son intersection avec S. E : bas de profil, en équilibre hydrostatique indiquant la présence d'une nappe en profondeur. D1 et D2 : profils à drainage constant. Le flux d'eau traversant le profil est d'autant plus faible que D est éloigné de S. Q : profil montrant un flux ascendant dans sa partie supérieure, un flux descendant dans sa partie inférieure. PFN, le plan de flux nul se situe là où la tangente au profil est verticale.

files de charge hydraulique renseignent immédiatement sur la situation hydrostatique ou hydrodynamique du site étudié (figure 6), et ce d'autant mieux que le sol est profond et homogène. Ainsi, la présence d'une nappe profonde sera signalée par un profil vertical coupant la droite de saturation. Un drainage à flux constant est repérable par un profil parallèle à la droite de saturation, d'autant plus éloigné d'elle que le flux sera faible. C'est le type de profil qui peut se rencontrer sous canne à sucre en saison des pluies, ou lors d'irrigations prolongées.

La sonde à neutrons

Cet appareil permet de mesurer *in situ* l'humidité volumique du sol. Son principe de fonctionnement est le suivant : une source de neutrons rapides (mélange américium-béryllium) est descendue dans le tube de mesure enfoncé dans le sol. Ces



neutrons sont ralentis par les chocs élastiques qu'ils subissent avec les atomes du milieu. L'influence des noyaux d'hydrogène, dont la masse est proche de celle du neutron, est prépondérante dans le phénomène de ralentissement. Les neutrons dont l'énergie est diminuée jusqu'à l'équilibre avec le milieu (neutrons thermiques) sont détectés par un compteur. Leur nombre est sensiblement proportionnel au taux d'hydrogène du milieu, donc à l'humidité volumique (MARCESSE et COUCHAT, 1973 ; HILLEL, 1980).

La sphère d'influence de l'humidimètre à neutrons est définie comme le volume de sol contenant 95 % du flux de neutrons thermiques. Son rayon est donné par la formule de VAN BAVEL (1963) :

$$R \text{ (cm)} = 15 (1/\theta)^{1/3}$$

Une simple application numérique ($\theta = 0,30 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$, $R = 22 \text{ cm}$; $\theta = 0,15 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$, $R = 28 \text{ cm}$) montre que les variations importantes de l'humidité qui seraient présentes à l'échelle centimétrique le long du tube ne sont pas complètement restituées par la mesure.

Les limites de la sonde sont bien connues :

- la méthode est inapplicable pour la mesure à proximité de la surface (première mesure à 20 cm). L'emploi d'un réflecteur neutronique permet de commencer les mesures à 10 cm ;
- la méthode est inutilisable quand l'installation du tube perturbe trop les caractéristiques hydrodynamiques du milieu (cuirasse, sols à galets, cailloux) ;
- l'étalonnage doit parfois être effectué pour chaque horizon du sol ;
- le comptage est imprécis. Ce défaut de précision est inhérent à l'emploi de la radioactivité et peut être diminué par le choix d'un temps de comptage plus long ou la répétition de la mesure. La précision accessible sur le terrain est de 1 % en humidité volumique.

Introduite sur le terrain à la fin des années 60 et au début des années 70, la méthode neutronique a rendu de grands services en permettant d'effectuer pour chaque site

étudié les cinétiques d'infiltration et de drainage (figure 7) ou de suivre les variations de stock d'eau sous culture. La détermination d'un paramètre essentiel en agriculture, la capacité de rétention, a ainsi gagné en fiabilité (MARCESSE, 1967 ; DANCETTE, 1970 ; VALET et MARCESSE, 1980).

Les sondes réflectométriques

La réflectométrie temporelle (TDR : *time domain reflectometry*) repose sur la mesure du temps de propagation aller-retour d'une impulsion électromagnétique le long de sondes

enfoncées dans le sol jouant le rôle de guides d'onde. Ce temps dépend de la longueur des guides (2 à 3 tiges en acier inoxydable parallèles mesurant 15 à 70 mm, voire plus), et de la vitesse à laquelle l'onde électromagnétique traverse le matériau. Cette vitesse (v) dépend de la constante diélectrique du milieu (K_a) selon l'équation suivante :

$$K_a = (c / v)^2$$

avec, c , la célérité de la lumière (vitesse dans le vide).

Cette constante vaut 1 pour l'air, 3 à 5 pour les particules minérales et 80 pour l'eau, dans le domaine de fréquence utilisé (autour du gigahertz). Le temps de propagation de l'onde va donc dépendre essentiellement

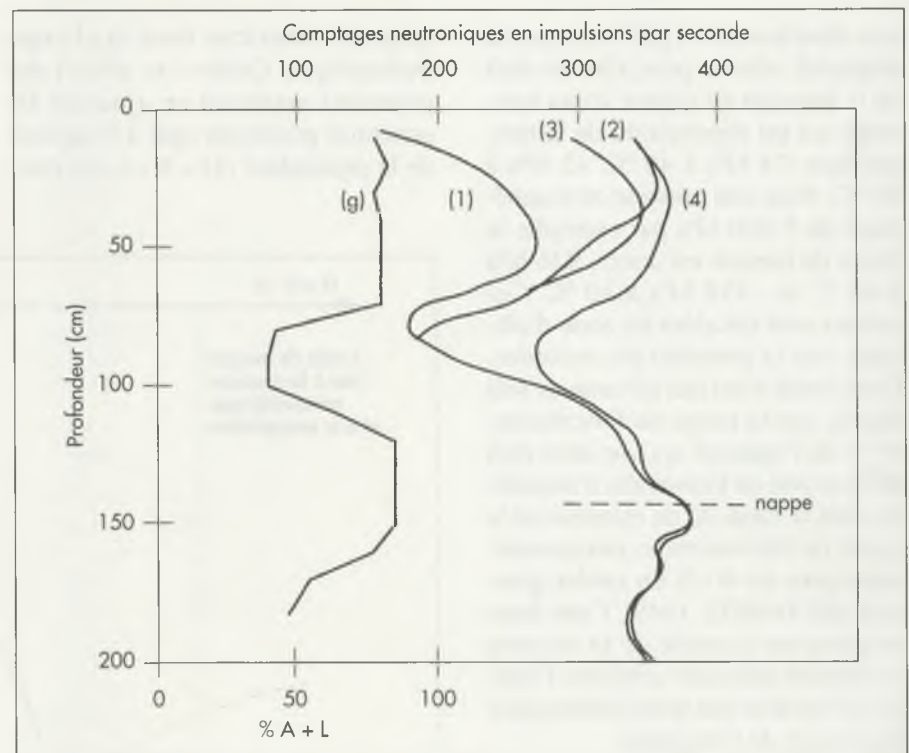


Figure 7. Profils neutroniques obtenus par DANCETTE *et al.* (1969) sur le périmètre expérimental de 120 ha de Richard-Toll (Sénégal).

Cet exemple rappelle la nécessité de l'étalonnage pour obtenir l'humidité volumique et l'intérêt d'associer des mesures tensiométriques à la mesure de l'humidité pour connaître les flux profonds. La présence de discontinuités granulométriques et d'une nappe influencent fortement la dynamique de l'eau. La connaissance de ces facteurs permet de mieux définir les apports pour satisfaire les besoins en eau de la canne.

(g) : profil de la fraction argile + limons (A + L)

1) profil neutronique initial sec

2) profil neutronique obtenu 1 jour après le premier apport de 125 mm

3) profil neutronique obtenu 27 jours plus tard

4) profil neutronique obtenu 7 jours après un second apport de 200 mm, effectué un mois après le premier apport.

de la teneur en eau du sol. Un étalonnage permet de relier la constante diélectrique à l'humidité volumique.

Le dispositif de mesure peut comprendre plusieurs séries de guides. Le volume de sol exploré par une sonde correspond à un rayon de 3 cm environ autour des tiges. Ceci permet des mesures assez proches de la surface du sol. Les tiges peuvent être implantées horizontalement, à partir d'une fosse, ou verticalement (diamètre des tiges autour de 5 mm). Le multiplexage permet de travailler avec plusieurs guides d'ondes, ou sondes, simultanément. Celles-ci peuvent être complètement enterrées. L'installation assez facile du matériel de mesure et sa souplesse d'utilisation rendent cette technique très intéressante pour les cas où la teneur en eau du sol varie beaucoup à l'échelle centimétrique, comme par exemple sous un goutteur ou à proximité d'un petit asperseur employé en irrigation localisée (NGUYEN-THE, 1992 ; TODOROFF et LANGELLIER, 1994).

Un développement récent de la technique se traduit par la restitution

d'un profil d'humidité à partir d'une sonde atteignant un mètre (TODOROFF, 1998).

Conclusion

En dissociant l'effet du climat de celui du développement de la plante, la méthode climatique de détermination des besoins en eau se place à un niveau d'application très général. Les coefficients culturaux K_c sont associés à une situation où la nutrition minérale de la canne est satisfaisante et où les ennemis de la culture (maladies, etc.) sont inopérants. Aucun facteur limitant de la croissance n'est identifié, excepté ceux liés au climat (rayonnement, température). Cette méthode donne donc une borne supérieure des besoins en eau qui peut servir pour le choix et le dimensionnement d'un système d'irrigation.

Sur le terrain, la canne ne pousse pas forcément dans des conditions idéales. Il y a donc le risque d'apporter plus d'eau que nécessaire en appliquant sans discernement les coefficients culturaux. Le bilan

hydrique doit donc être contrôlé à chaque campagne, sur le terrain pour éviter des dérives trop importantes, et apporter les correctifs nécessaires, par exemple en tenant compte de l'évolution du rendement potentiel de chaque repousse.

La méthode tensiométrique est une alternative intéressante mais il faut pouvoir mobiliser la ressource en eau à tout moment : c'est le cas d'un pivot d'arrosage muni d'une unité de pompage indépendante, mais cela n'est plus possible si plusieurs pivots doivent respecter un planning d'emploi (limitation de l'énergie ou de l'eau). Cette limitation vaut à plus forte raison sous un canon d'arrosage ou un asperseur déplaçable.

Les tensiomètres permettent de suivre en direct la relation eau-sol-plante alors que les coefficients culturaux, indispensables pour faire tourner les modèles de bilan hydrique, doivent être améliorés pour bien tenir compte de la situation locale (DANCETTE, 1991). Ils ont donc tous les deux leur place dans la panoplie des outils de l'exploitant.

Bibliographie

ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n° 56, 300 p.

BARAN R., 1982. Synthèse de l'expérimentation agronomique conduite dans le cadre du développement de la région de Morondava, Madagascar, 1973-1978. Travaux Gerdat, Irat, Paris, France, 260 p.

BISWAS B.C., 1988. Agroclimatology of the sugar-cane crop. Technical note n° 193, World Meteorological Organization, Genève, Suisse, 90 p.

CHARROY J., FOREST F., LEGOUPIL J.-C., BASSEREAU D., 1978. Besoins en eau de la canne à sucre. L'Agron. Trop. 33 (4) : 344-369.

COMBRES J.C., LE MEZO L., BOURON B., METE M., 1999. Réserve utile et mesures d'humidité. Difficulté de calage des modèles de bilan hydrique. Agriculture et Développement 24 : 39-47.

DANCETTE C., BARAN R., DUC T.M., GILLET N., 1969. Etude *in situ* des caractéristiques hydriques et hydrodynamiques des principaux types de sols du

casier canne à sucre : 120 ha, de Richard-Toll. Irat, Nogent-sur-Marne, France, 3 volumes, 350 p.

DANCETTE C., 1970. Détermination au champ de la capacité de rétention après irrigation dans un sol sableux du Sénégal. L'Agron. Trop. 25 (3) : 225-240.

DANCETTE C., 1991. Critique des recherches sur le bilan hydrique en zone soudano-sahélienne. In IAHS Publication 199, IAHS Press, Wellingford, Grande Bretagne, p. 45-62.

DEVANNE E., 1990. Etude pédoclimatique du périmètre irrigué du Bras de Cilaos (la Réunion). Application à l'irrigation de la canne à sucre. Irat Réunion, Esat, France, 21 p.

DOORENBOS J., PRUITT W.O., 1976. Les besoins en eau des cultures. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n° 24 : 1-198.

DUC T.M., 1973. Etudes sur l'irrigation par aspersion en région sahélienne (Tillabéry-République du Niger). Le vent, les asperseurs. L'Agron. Trop. 28 (9) : 901-915.

FOREST F., 1985. Observation de profils racinaires, interactions eau-sol-racines-travail du sol-dose d'irrigation. Périmètre sucrier de Banda (Tchad). Irat, Montpellier, France, 29 p.

GAUDIN R., BROUWERS M., CHOPART J.-L., 1999. L'eau utile et les caractéristiques

hydrodynamiques des sols sous culture de canne à sucre. Agriculture et Développement, 24 : 30-38.

GAUDIN R., RAPANOELINA M., ORIOU P., 1990. Rapport scientifique des études tensiométriques pour l'irrigation à la SIRANALA. Laboratoire des radio-isotopes, Tananarive et Entreprise Socialiste Siramamin'Analaiva, Morondava, Madagascar. 42 p.

GAUDIN R., RAPANOELINA M., ORIOU P., 1998. Analyses tensiométriques appliquées au pilotage d'irrigation. Cahiers Agricultures 7 : 131-138.

GENERE B., 1985. Réseau multilocal de mesures climatiques à la Réunion : pour une connaissance fiable du mésoclimat et l'appui à l'expérimentation agronomique. L'Agron. Trop. 40 (3) : 202-210.

GENERE B., 1990. Etude de l'évapotranspiration potentielle (ETP Penman) à la Réunion. L'Agron. Trop. 45 (2) : 115-123.

HILLEL D., 1980. Fundamentals of soil physics. New York, Etats-Unis, Academic Press, 413 p.

IRAT, 1969. Station expérimentale d'hydraulique agricole de Mogtedo. Rapport de fin de campagne 1968-1969. Annexe 2 : évapotranspiration. Ministère du développement et du tourisme de la Haute-Volta, Irat, France, 104 p.



ITIER B., BRISSON N., DOUSSAN C., TOURNEBIZE R., 1996. Bilan hydrique en agrométéorologie. In Actes de l'école-chercheurs Inra en Bioclimatologie, CRUIZIAT P. et LAGOUARDE J.-P. (Coordonnateurs), Inra éditions, Thiverval-Grignon, France, p. 383-397.

LANGELLIER P., 1980. Détermination du régime hydrique d'une culture de canne à sucre de milieu, en période de maturation, dans le nord de la Côte d'Ivoire. L'Agron. Trop. 35 (3) : 232-232.

MARCESSE J., 1967. Détermination *in situ* de la capacité de rétention d'un sol au moyen d'un humidimètre à neutrons. In Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies, IAEA-SM-94/14, Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, Autriche. p. 137-145.

MARCESSE J., COUCHAT P., 1973. Etude hydrodynamique des sols à l'aide d'un humidimètre à neutrons. In Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies, IAEA-SM-176/23, Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, Autriche. p. 277-293.

MONTENY B.A., 1991. Evaluation de la consommation en eau de la canne à sucre pour l'amélioration de la production en région soudano-sahélienne. In Influence du climat sur la production des cultures tropicales, FIS-CTA et Organisation islamique pour l'éducation et la culture (éditeurs), p. 129-143.

NGUYEN-THE N., 1992. Utilisation de la réflectométrie (TDR) pour l'étude du comportement hydrodynamique d'un sol ferrallitique de la Réunion. Ensam Montpellier ; Cirad-ca, Réunion, France, 43 p.

ORIOU P., RAPANOELINA M., GAUDIN R., 1995. Le pilotage de l'irrigation de la canne à sucre par tensiomètres. Agriculture et Développement 6 : 39-48.

PENMAN H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. Lond., 193 (1) : 120-145.

PEREIRA L.S., SMITH M., ALLEN R., 1998. Méthode pratique de calcul des besoins en eau. In Traité de l'irrigation, TIERCELIN J. R. (Coordonnateur), Tec & Doc, Lavoisier, Paris, France, p. 206-231.

PERRIER A., ARCHER P., BLANCO DE PABLOS A., 1974. Etude de l'évapotranspiration réelle et maximale de diverses cultures : dispositif et mesures. Ann. Agon. 25 (5) : 697-731.

POSER C., sous presse. Etude des besoins en eau de la région Ouest de la Réunion. Irrigouest. Cirad, sous presse.

RAPANOELINA M., GAUDIN R., ORIOU P., 1999. Sables roux, pivots, tensiomètres : comment ajuster les irrigations ? Agriculture et Développement 24 : 126-131.

RICHARDS L.A., 1949. Methods of measuring soil moisture tension. Soil Sci. 8 : 95-112.

RICHARDS L.A., 1960. Advances in soil physics. In Proceedings of 7th Int. Congress of Soil Science, Madison, Wisconsin, Etats-Unis, vol. 1, p. 67-79.

RICHARDS S.J., MARSH A.W., 1961. Irrigation based on soil suction measurements. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 25 : 65-70.

TIERCELIN J.R., 1998. Traité d'irrigation. Paris, France, Tech & Doc Lavoisier, 1 011 p.

TODOROFF P., 1998. Modélisation de la propagation de micro-ondes dans le sol afin d'obtenir un profil hydrique par réflectométrie temporelle. Thèse de doctorat, université de la Réunion, France, 127 p.

TODOROFF P., LANGELLIER P., 1994. La réflectométrie temporelle, une nouvelle approche des mesures d'humidité du sol. Agriculture et Développement 3 : 32-37.

VALET S., MARCESSE J., 1980. Prospection hydropédologique, amélioration foncière et essais d'irrigation sous cultures, en vue de l'aménagement des terrasses du fleuve Niger à Tillabery. L'Agron. Trop. 35 (2) : 115-133.

VAN BAVEL C.H.M., 1963. Neutron scattering measurement soil moisture : development and current status. Proc. Int. Symp. Humidity Moisture, Washington D.C., Etats-Unis, p. 171-184.

Résumé...Abstract...Resumen

R. GAUDIN — L'évaluation des besoins en eau de la canne.

Plusieurs exemples illustrent l'emploi de la méthode climatique pour déterminer les besoins en eau de la canne. La référence à l'évaporation doit être précisée : pour des études anciennes, il s'agit de l'évaporation d'un gazon ou de l'évaporation en bac. Dans les études plus récentes, la formule de Penman, où sont rentrés les paramètres afférents à un gazon en croissance, est de plus en plus utilisée. Les coefficients culturaux s'établissent autour de 0,4 dans les premiers mois du cycle et atteignent 1,1 à 1,2 en phase de grande croissance. Ces valeurs sont à majorer lorsque le vent modifie le bilan d'énergie de la culture : c'est le cas en période d'harmattan pour la zone soudano-sahélienne. La méthode tensiométrique de pilotage des irrigations est aussi une méthode directe de détermination des besoins en eau, applicable lorsque la ressource en eau n'est pas limitée et lorsque la circulation de l'eau au sein du sol est favorisée par la grande profondeur et l'homogénéité du profil et par la prépondérance des sables. L'emploi des méthodes climatique et tensiométrique va de pair avec l'établissement du bilan hydrique de la culture. Trois outils sont décrits : les tensiomètres, la sonde à neutrons, les sondes réflectométriques.

Mots-clés : besoins en eau, *Saccharum*, irrigation, méthode climatique, bilan hydrique, tensiomètre, sonde à neutrons, Afrique.

R. GAUDIN — Evaluation of sugarcane water requirements.

There are several examples of the use of the climatic method to determine sugarcane water requirements. It is important to be specific about any reference to evaporation: in older studies, this refers to evaporation from grass or from a pan, while in more recent studies, Penman's formula, which integrates the parameters relating to growing grass, has increasingly been used. The crop coefficients are around 0.4 in the initial months of the cycle, reaching 1.1 to 1.2 during the main growth stage. These values are higher if the wind affects the crop energy balance, as is the case during the Harmattan in Sudanian-Sahelian areas. The tensiometric method of irrigation control is also a direct way of determining water requirements, which can be used if water supplies are not limited and water circulation within the soil is favoured by the depth and homogeneity of the profile and the preponderance of sand in the soil. Using climatic and tensiometric methods goes hand in hand with establishing the crop water balance. Three tools are described: tensiometers, neutron probes and reflectometric probes.

Keywords: water requirements, *Saccharum*, irrigation, climatic method, water balance, tensiometer, neutron probe, Africa

R. GAUDIN — Evaluación de los requerimientos hídricos de la caña.

Varios ejemplos ilustran el empleo del método climático para determinar las necesidades de agua de la caña. Debe precisarse la referencia a la evaporación: en estudios más antiguos, se trata de la evaporación de césped o de la evaporación en recipiente. En los estudios más recientes se utiliza cada vez más la fórmula de Penman, en la que entran los parámetros relativos a un césped en crecimiento. Los coeficientes de cultivo se establecen alrededor de 0,4 en los primeros meses del ciclo y alcanzan 1,1 a 1,2 en la fase de gran crecimiento. Dichos valores deben incrementarse cuando el viento modifica el balance de energía del cultivo: esto ocurre en periodo de harmattan en la zona sudano saheliense. El método tensiométrico de control de riegos es también un método directo para determinar los requerimientos hídricos, aplicable cuando los recursos de agua no son limitados y cuando la gran profundidad, la homogeneidad del perfil y el predominio de arenas favorecen la circulación del agua en el suelo. El empleo de los métodos climático y tensiométrico va acompañado del establecimiento del balance hídrico del cultivo. Se describen tres instrumentos: tensiómetros, sonda de neutrones y sondas reflectométricas.

Palabras clave: requerimientos hídricos, *Saccharum*, riego, método climático, balance hídrico, tensiómetro, sonda de neutrones, África.