

Prédiction de la profondeur de sol humidifié sous goutteur

Wetting front depth prediction beneath a drip irrigation device

M. HAMMAMI^{1*} et M. MAALEJ²

Reçu le 18 novembre 1997, accepté le 19 novembre 1998**.

SUMMARY

In trickle irrigation, the wetted soil volume fraction (P) is a fundamental parameter for both network design and irrigation scheduling. However, methods used to determine such parameter (P) are still limited and unaccurate. Further, numerical models established for predicting wetted soil volume (or bulb) dimensions remain onerous, complex, expensive, and therefore hardly used.

Experimental and numerical results performed on water infiltration from point source on the soil surface show a close relationship between the horizontal and vertical bulb dimensions.

This study which was based on continuity and cumulative infiltration equations allowed to establish a new and simple equation for predicting wetted soil depth. This equation enables, knowing initial and wetting front water content and $K(h_f)$ (soil hydraulic conductivity on the wetting front), to calculate the front depth $Z_f(t)$ beneath a point source with only measuring the front radius $R_f(t)$ on the soil surface. The established equation verifies physical conditions of axisymmetric water infiltration into the soil.

The established equation was tested by performing trials on two different soil types and three discharge rates. Two different procedures were simultaneously used for determining $R_f(t)$ and $Z_f(t)$.

i) observing bulb dimensions evolution on the soil surface and along the symmetry axis.

ii) $R_f(t)$ and $Z_f(t)$ values were inferred from the horizontal and vertical suction profiles respectively.

1. Hammami Moncef, École Supérieure d'Agriculture de Mateur 7030, Mateur, Tunisie.

Tél. : (02) 465 074 ; Fax. (02) 468088.

2. Maalej Mohamed, Institut National des Recherches Scientifiques de Tunis, Tunisie.

* Correspondance.

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 décembre 1999.

The $Z_f(t)$ values calculated, using such equation, are compared with those measured. The results showed good agreement between calculated and measured data ($R^2 \geq 0.94$).

This study was performed during an axisymmetric water infiltration into bare, homogeneous, and isotropic soil. It needs to be extended to heterogeneous, anisotropic and cultivated soils.

Key-words: drip-irrigation, prediction, wetting front depth, wetting front radius, infiltration.

RÉSUMÉ

À partir de résultats expérimentaux, des équations d'infiltration et de continuité, nous avons établi une équation permettant de prédire la profondeur maximale humidifiée par un goutteur à la surface du sol.

Connaissant l'humidité initiale du sol θ_i , la conductivité hydraulique K_f et la teneur en eau au niveau du front θ_f ; l'équation établie permet de calculer la profondeur du front d'humectation $Z_f(t)$ à partir du suivi du rayon du front d'humectation $R_f(t)$ à la surface du sol.

Pour tester la validité de cette nouvelle approche, des essais ont été menés sur deux types de sol (sableux et limono-argileux) et avec trois débits différents. Les valeurs de $Z_f(t)$ mesurées (par deux techniques différentes) ont été comparées à celles calculées par cette équation, les résultats étaient, dans tous les cas, quasi-identiques (coefficient de corrélation R^2 , dans tous les cas, supérieur ou égal à 0,94).

Mots clés : irrigation goutte-à-goutte, prédiction, profondeur du front d'humectation, rayon du front d'humectation, infiltration.

1 – INTRODUCTION

En irrigation goutte-à-goutte, la localisation des apports (eau et engrais) entraîne une nette réduction de la surface et du volume de sol effectivement humidifiés et par conséquent une réduction des pertes d'eau par évaporation et par percolation profonde. Toutefois lorsque ces apports deviennent importants, les pertes d'eau et d'engrais, au-delà des racines, pourraient être considérables. En 1993, MICHELAKIS *et al.* ont déjà relevé des pertes en profondeur nulles, modérées ou élevées pour trois régimes 0,30.E ; 0,60.E et 0,90.E (où E = évaporation Bac Class A) d'irrigation goutte-à-goutte d'un verger d'avocatsiers.

Pour un apport ponctuel total de 12 L, fourni en trois débits différents : 2, 4 ou 8 L/h, LEVIN *et al.* (1979) ont évalué les pertes (au-delà de 60 cm) dans un sol sableux à 26 %.

Afin de limiter ces pertes, la profondeur du bulbe (qui serait humidifié lors d'un apport localisé de dose et de débit donnés) doit être estimée. Les modèles numériques, traitant ce type d'écoulement sont multiples mais demeurent trop coûteux et restrictifs pour être appliqués à l'échelle de la parcelle.

Des formules, déduites de résultats numériques (ABABOU, 1981 ; HEALY et WARRICK, 1988) permettent de suivre l'évolution des dimensions du bulbe connaissant les caractéristiques physiques du sol.

D'autres modèles empiriques (SCHWARTZMASS et ZUR (1985) ; cité par KELLER et BLIESNER 1990) ont été aussi établis pour suivre l'évolution des dimensions maximales Z_m (profondeur) et D_m (diamètre) du bulbe humidifié, en fonction du débit et de la quantité d'eau fournie dans un sol sableux. Ces auteurs ont dégagé une relation empirique où D_m est une fonction puissance de Z_m , du débit du gouteur et de K_s (conductivité hydraulique du sol à la saturation). Théoriquement, la relation établie ne vérifie pas la condition au limite : $Z_m \rightarrow \infty$, $D_m \rightarrow$ limite finie. Par ailleurs la mise en application d'une telle équation pose le problème de détermination de la valeur du diamètre maximum du bulbe D_m puisque cette dimension évolue avec l'extension du bulbe en profondeur dans le sol. KELLER et BLIESNER (1990) ont établi, à partir des résultats expérimentaux de ROTH (1974), des courbes entre les mêmes variables (D_m et Z_m).

Cette étude expérimentale propose de présenter une nouvelle approche permettant de prédire la profondeur maximale du front d'humidification $Z_f(t)$ à partir du suivi de son rayon $R_f(t)$ mesuré à la surface.

2 – APPROCHE THÉORIQUE

L'infiltration de l'eau, à partir d'un gouteur placé à la surface du sol est un écoulement tridimensionnel avec un front d'humidification « zone de transition » mobile dans l'espace. Ce mouvement est la résultante de flux diffusif-convectif de l'eau dans le sol. Toutefois l'avancement du front à la surface (le long de l'axe horizontal « r ») résulte uniquement d'une infiltration horizontale de l'eau dans le sol vérifiant l'équation :

$$\partial\theta/\partial t = \partial/(r\partial r)\{rK(h)\partial h/\partial r\} \quad (1)$$

Alors que, par raison de symétrie (milieu homogène et isotrope), l'avancement du front d'humidification le long de l'axe vertical « z » résulte essentiellement d'une infiltration verticale de l'eau dans le sol vérifiant l'équation :

$$\partial\theta/\partial t = \partial/(\partial z)\{K(h)\partial h/\partial z\} - \partial K(h)/\partial z \quad (2)$$

où :

θ : teneur en eau volumique du sol (L^3/L^3).

h : pression de l'eau du sol (L).

$K(h)$: conductivité hydraulique du sol (L/T).

r et z sont les coordonnées cylindriques radiale et verticale (L) respectivement.

t : temps (s).

Pour un profil initial uniforme, la teneur en eau est :

$$\theta = \theta_1, \quad r \geq 0, \quad z \geq 0, \quad t = 0 \quad (3)$$

Alors qu'au voisinage de la source, la condition suivante est admise :

$$h = 0, r = 0, z = 0, t > 0 \quad (4)$$

Dans ces conditions, la lame d'eau infiltrée $I_h(L)$ suivant l'axe horizontal à la surface (VAUCLIN, 1988 ; SMETTEM *et al.*, 1995 ; ...) est :

$$I_h = S t^{1/2} \quad (5)$$

où S : la sportivité du sol ($L T^{-1/2}$).

Dans les mêmes conditions, HAVERKAMP *et al.* (1994) et SMETTEM *et al.* (1995) ont proposé, pour déterminer la lame d'eau infiltrée $I_v(L)$ le long de la verticale, une solution simple qu'ils ont vérifiée par des essais d'infiltration à partir d'un infiltromètre à disque :

$$I_v = S t^{1/2} + \{K_i + (2 - \beta)/3(K_n - K_i)\}t \quad (6)$$

K_i et K_n sont les conductivités hydrauliques initiale et au niveau de la zone d'apport, β est un facteur de forme (HAVERKAMP *et al.*, 1994).

Admettons les hypothèses de GREEN et AMPT (1911) (cité par HILLEL, 1988 ; GARDNER, 1970) :

$$\begin{aligned} R(r, z = 0, t) \leq R_f(t) &\Rightarrow \theta(r, z = 0, t) = \theta_f \\ R(r, z = 0, t) > R_f(t) &\Rightarrow \theta(r, z = 0, t) = \theta_i \\ Z(r = 0, z, t) \leq Z_f(t) &\Rightarrow \theta(r = 0, z, t) = \theta_f \\ Z(r = 0, z, t) > Z_f(t) &\Rightarrow \theta(r = 0, z, t) = \theta_i \end{aligned} \quad (7)$$

Les indices i et f se réfèrent aux conditions initiale et au niveau du front d'humidification. Dans ces conditions, en appliquant l'équation de continuité aux lames d'eau I_h et I_v infiltrées, on obtient :

$$I_h = S t^{1/2} = (\theta_f - \theta_i)R_f(t) \quad (8)$$

$$I_v = S t^{1/2} + \{K_i + (2 - \beta)/3(K_n - K_i)\}t = (\theta_f - \theta_i)Z_f(t) \quad (9)$$

La sorptivité « S », caractéristique intégrale, ne dépend que des humidités initiale et finale du sol. « S » n'a de signification que par rapport à un état initial du milieu et à une condition aux limites donnée » (HILLEL, 1988). Étant données les hypothèses (7), le terme $S t^{1/2}$ peut être substitué par sa valeur en (8), ce qui donne :

$$Z_f(t) = R_f(t) + \{K_i + (2 - \beta)/3(K_n - K_i)\}t/(\theta_f - \theta_i) \quad (10)$$

Le facteur de forme β est tel que $0 \leq \beta \leq 1$ (HAVERKAMP *et al.*, 1994) mais β devrait être constant pour des milieux poreux à structures similaires (CINDY et JAMES, 1996). D'ailleurs HAVERKAMP *et al.* (1994), SMETTEM *et al.* (1995) ont pris, pour des sols limono-sableux et sablo-limoneux (Redlands) respectivement $\beta = 0,56$ et $\beta = 0,60$. Alors, pour simplifier, en prenant $\beta = 0,50$, $K_n = K_f$ et en négligeant K_i par rapport à K_f (K_i/K_f de l'ordre de 10^{-5} dans le cas de ces essais) il en résulte :

$$Z_f(t) = R_f(t) + 1/2 K_f t/(\theta_f - \theta_i) \quad (11)$$

D'après cette dernière équation, la profondeur « maximale » du front d'humidification $Z_f(t)$ est une fonction monotone croissante de son rayon (à la surface) $R_f(t)$ et elle vérifie les conditions :

$$\begin{aligned} t = 0, R_f(t) = 0 &\Rightarrow Z_f(t) = 0 \\ t \rightarrow \infty, Z_f(t) &\rightarrow \infty \\ t > 0 &\Rightarrow \partial Z_f(t) / \partial R_f(t) \geq 0 \\ t > 0 &\Rightarrow Z_f(t) \geq R_f(t) \end{aligned} \quad (12)$$

Il est aussi facile de noter que $Z_f(t)$ est la somme d'un transfert diffusif-convectif de l'eau dans le sol où le terme convectif devient de plus en plus dominant au fur et à mesure que t tend vers l'infini ($R_f(t)$ tend vers une limite alors que le terme $1/2K_f t / (\theta_f - \theta_i)$ est monotone croissant).

Pour vérifier ce résultat, nous avons mené des essais de suivi de l'évolution des dimensions du front d'humidification $Z_f(t)$ et $R_f(t)$ lors d'une infiltration sous goutteur dans deux types de sols (sableux et limono-argileux) et avec trois débits différents.

3 – MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les essais ont été menés au laboratoire dans un fût mi-cylindrique de 1,50 m de diamètre et 1,20 m de hauteur, au fond duquel ont été percés des orifices de drainage afin d'y éviter la formation d'une zone saturée. La face plane en verre permet une vision nette de l'avancement du front d'humectation (figure 1).

Le fût a été successivement rempli avec du sol sableux puis limono-argileux sur une couche de gravier de 5 cm d'épaisseur où ont été percés les orifices de

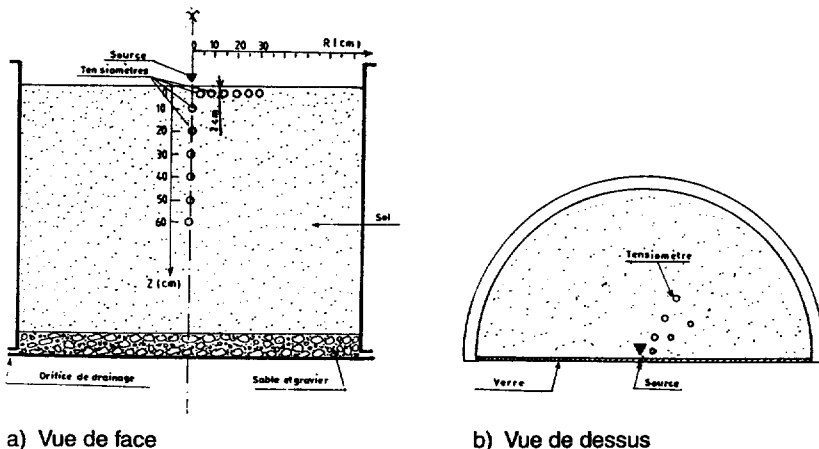


Figure 1 Schéma du dispositif expérimental.
Experimental device.

drainage. Des tensiomètres à mercure ont été soigneusement implantés dans le sol afin de suivre l'évolution de la succion.

À chaque essai, le sol a été séché et homogénéisé à l'air libre puis remis dans le fût. La surface a été, ensuite, soigneusement aplanie dans le but d'éviter toute dissymétrie de la distribution de l'eau dans le sol. Le fût est ainsi laissé au repos pendant 3 à 4 jours pour favoriser le tassement naturel et l'équilibre entre le sol et les bougies des tensiomètres.

Trois valeurs de débit (1 L/h, 2 L/h et 4 L/h) ont été successivement appliquées pour chaque sol. La durée d'infiltration a été dans tous les cas fixée à 12 h. La source a été matérialisée par un capillaire alimenté à partir d'un réservoir à niveau constant. La longueur du capillaire permet, à chaque fois, d'ajuster la valeur du débit.

Les variables mesurées :

a – le rayon du front à la surface (notée $R_f(t)$), mesuré à partir du point source, origine de l'axe de symétrie. Ce paramètre est plus facile à mesurer par comparaison à D_m ou R_s (rayon de la zone saturée en surface) qui disparaissent aussitôt que l'infiltration est arrêtée.

b – la profondeur du front (notée $Z_f(t)$), mesurée le long de l'axe de symétrie et à partir de la surface.

Dans un souci d'avoir des résultats fiables et précis, les mesures ont été effectuées simultanément selon deux méthodes différentes :

– Mesures directes à la règle : chaque valeur de $Z_f(t)$ correspond à la moyenne de trois lectures prélevées à travers la face transparente. En revanche, chaque valeur de $R_f(t)$ est déduite de la mesure du périmètre mouillé prélevé à l'aide d'une ficelle.

Afin d'éviter un éventuel écoulement préférentiel le long de la face latérale en verre, la source a été placée à la surface et à 2 cm le long de la médiane. Hormis ce risque, la localisation du front pourrait être mesurée avec précision. D'ailleurs, le suivi visuel du front est parfois préconisé pour juger de la précision des résultats numériques (BRESLER *et al.*, 1971 ; WARD *et al.*, 1995) ou des mesures TDR (KACHANOSKI *et al.*, 1990). Cependant, le suivi visuel du front reste un moyen d'évaluation qualitatif et ne pourrait en aucun cas renseigner sur la valeur de l'humidité du sol ou de la quantité d'eau infiltrée.

– Suivi tensiométrique : le front d'humectation est la surface latérale « ou frontière » du volume humecté. C'est aussi l'ensemble des points où le gradient de succion (h) est maximal (HILLEL, 1988) et constitue d'ailleurs la force nécessaire pour la redistribution de l'eau dans le sol (CLEMENT *et al.*, 1994). Autrement dit, les coordonnées r et z du front sont, à tout moment, définies par :

$$\partial h / \partial r = \max \quad \partial h / \partial z = \max \quad (13)$$

Pour suivre l'évolution de la succion le long des axes horizontal et vertical, les tensiomètres ont été placés à une profondeur de 2 cm de la surface et aux rayons 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm et 30 cm par rapport à la source {pour $h(r, z = 0, t)$ } et à des profondeurs de 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm et 60 cm le long de l'axe de symétrie {pour $h(r = 0, z, t)$ }. Les tensiomètres à mercure donnent la valeur de la succion avec précision et pour un volume de sol réduit ; critères exigés pour la précision du suivi des coordonnées du front. Seulement le retard de réponse dû à l'impédance des bougies, pourrait induire une sous-estimation de $R_f(t)$ et $Z_f(t)$ par rapport au suivi visuel (mesure à la règle).

4 – RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La figure 2 montre des exemples de profils de succion $h(r, z = 0)$ et $h(r = 0, z)$, prélevés à différents instants. À un temps donné t_i , les coordonnées du front $R_f(t_i)$ et $Z_f(t_i)$ ont été déterminées graphiquement par les abscisses des points d'inflexion des courbes $h(r, t_i)$ et $h(z, t_i)$. Les profils abrupts de la succion justifient l'application des hypothèses de GREEN et AMPT (1911) et permettent de localiser avec précision les valeurs de $R_f(t)$ et $Z_f(t)$. Cependant, la détermination des valeurs de h_f correspondantes reste délicate.

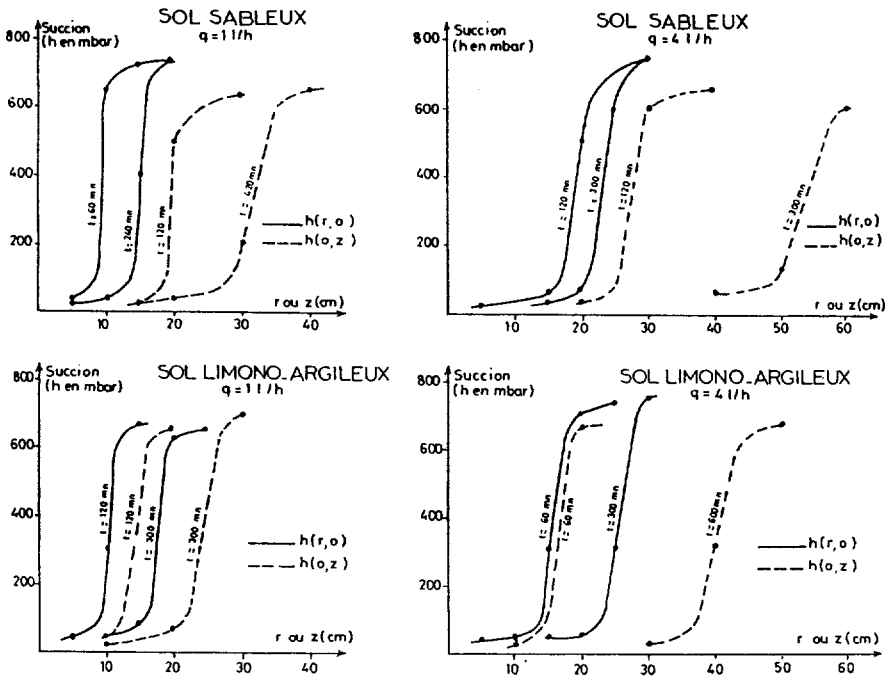


Figure 2 Quelques profils de la pression de l'eau dans le sol $h(r, z)$.
Suction head profiles $h(r, z)$.

Les valeurs de $R_f(t)$ et $Z_f(t)$ ainsi obtenues sont comparées à celles obtenues par suivi visuel. Pour tous les essais, les valeurs mesurées sont toujours supérieures, mais l'écart (figure 3), relativement élevé (de l'ordre de 18 %) au début d'infiltration ne cesse de diminuer au fil du temps suite à l'évolution de $R_f(t)$ et $Z_f(t)$. Cette différence est la conséquence du retard de réponse des tensiomètres. Par ailleurs un mauvais contact entre le sol et les bougies poreuses tend à amplifier ce retard.

Les points expérimentaux des couples $(Z_f(t), R_f(t))$ sont portés aux figures 4. Ils s'alignent suivant une courbe d'allure analogue à celles établies par KELLER et BLIESNER (1990). Ces courbes illustrent bien que $Z_f(t)$ est une fonction monotone croissante par rapport à $R_f(t)$ et vérifie les conditions (12). Donc les résultats expérimentaux corroborent l'approche théorique (équation 11). Mais cette der-

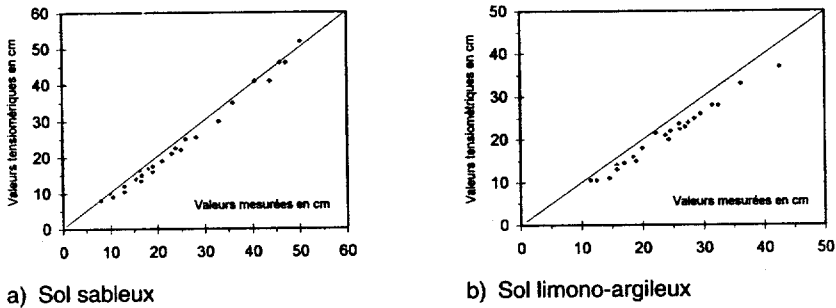


Figure 3 Comparaison des deux méthodes de suivi de $R_f(t)$ et $Z_f(t)$.
Comparison between measured and tensiometric values obtained in sandy (a) and silty-clay soils (b).

nière permet d'évaluer d'une façon plus explicite l'impact des différents facteurs sur l'évolution de $Z_f(t)$ par rapport à $R_f(t)$ et par suite prédire la géométrie du bulbe humidifié sous goutteur. En fait à travers $R_f(t)$, $K(h_f)$ et θ_f , l'équation reflète bien que dans les sols sableux (faible capillarité et conductivité hydraulique élevée) Z_f serait plus élevée et le volume humidifié ou bulbe serait par conséquent plus allongé en profondeur qu'en sols argileux. Ce résultat est net en comparant, pour un même débit, les figures 4a et 4b.

L'équation 11 stipule aussi que l'avancement du front serait d'autant plus lent que le sol est initialement sec, puisque si θ_i diminue, le terme $K(h_f)/(\theta_f - \theta_i)$ diminue ; résultats théoriquement plausibles (modèle de profil rectangulaire de RANDALL (1988)).

Les effets du débit et de la dose d'irrigation sur la géométrie du bulbe, sont aussi implicitement illustrés à travers l'équation (11). En effet, dans les mêmes conditions de sol et avec la même dose ($V = Q \cdot t$), une augmentation du débit Q entraîne une réduction du temps d'infiltration t et par suite une diminution du terme $K(h_f) \cdot t/(\theta_f - \theta_i)$ donc une augmentation de $R_f(t)$. En revanche, une diminution du débit entraîne une augmentation du temps t et par suite un accroissement du terme $K(h_f) \cdot t/(\theta_f - \theta_i)$ au dépens de $R_f(t)$.

LEVIN *et al.* (1979), BRESLER *et al.* (1971), ainsi que BRANDT *et al.* (1971), ont souligné les mêmes effets « débit » sur la géométrie du bulbe. BRESLER *et al.* (1971) ont expliqué ce résultat par l'action du débit sur l'aire de la zone saturée en surface.

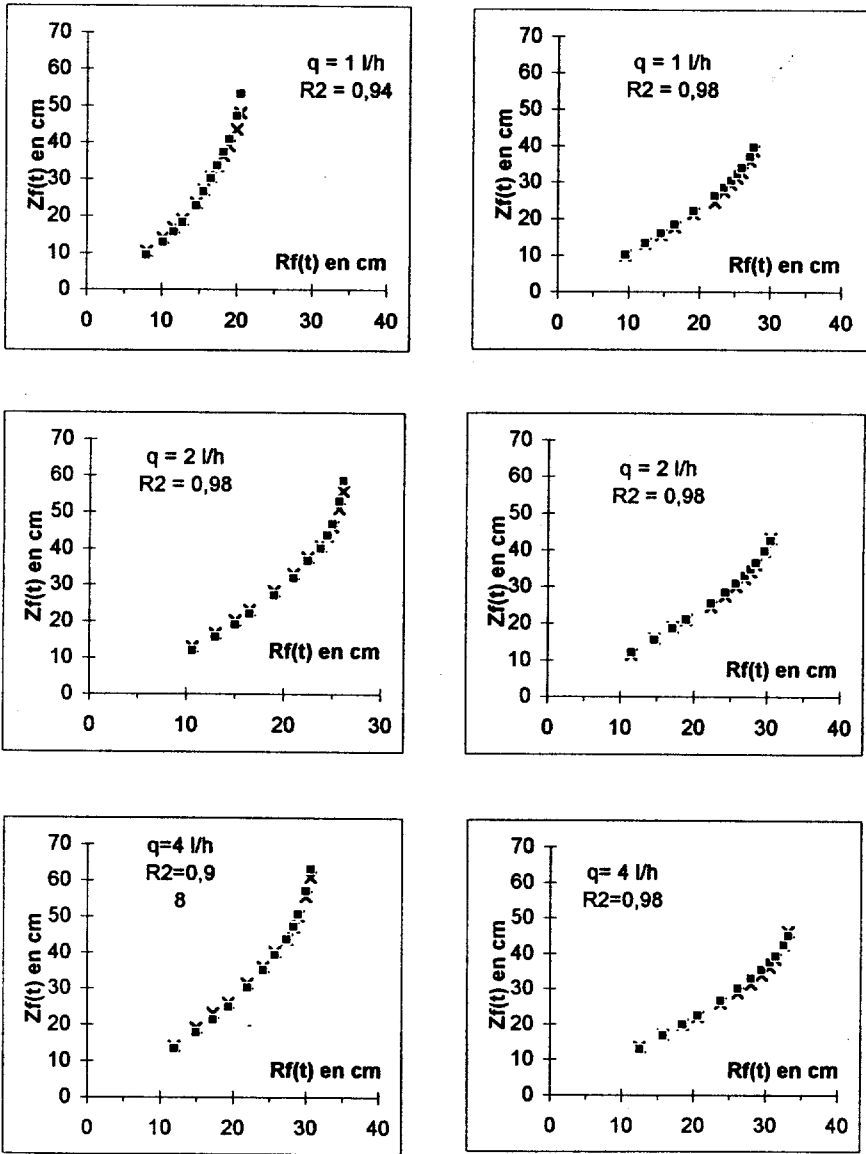
À partir des valeurs de $R_f(t)$, obtenues par mesures à la règle, nous avons calculé par la formule (11) celles de $Z_f(t)$ correspondantes. Les valeurs de θ_f et θ_i sont déduites des lois $\theta(h)$ préétablies (ajustement de données expérimentales au modèle de VAN GENUCHTEN (1980) ; équations 14).

$$(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r) = 1/\{1 + (0,025 \cdot h)^{2,5}\}^{0,6} \tag{14a}$$

pour le sol sableux où $\theta_s = 0,38 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; $\theta_r = 0,08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ et h est exprimée en mbar, et

$$(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r) = 1/\{1 + (0,025 \cdot h)^2\}^{1/2} \tag{14b}$$

pour le sol limono-argileux où $\theta_s = 0,58 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; $\theta_r = 0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ et h est aussi exprimée en mbar.



a) Sol sableux

b) Sol limono-argileux

Figure 4 Évolution de $Z_f(t)$ en fonction de $R_f(t)$; comparaison des valeurs mesurées (xxx) à celles calculées (...).

$Z_f(t)$ as function on $R_f(t)$; measured (xxx) among calculated (...) values obtained in sandy (a) and silty-clay (b) soils.

Chaque valeur de h_i correspond à la moyenne du profil de succions prélevé juste au début de l'infiltration. Alors que celle de h_f correspond à l'ordonnée du point d'inflexion de la courbe $h(r, t)$. Laquelle ordonnée était, dans tous les cas, de

l'ordre de 40 mbar, ceci est dû au fait que les profils initiaux $h(r, t = 0)$ étaient relativement peu différents (suction comprise entre 650 et 750 mbar).

Connaissant h_f et la loi (h) , la conductivité au niveau du front $K(h_f)$ a été calculée à partir du modèle (15) conforme à celui de VAN GENUCHTEN (1980) :

$$K(h)/K_s = \{(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)\}^{1/2} \{1 - [1 - ((\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r))^{1,66}]^{0,6}\}^2 \quad (15a)$$

pour le sol sableux où $K_s = 11,2$ cm/h, et

$$K(h)/K_s = \{(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)\}^{1/2} \{1 - [1 - ((\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r))^2]^{0,5}\}^2 \quad (15b)$$

pour le sol limono-argileux où $K_s = 5,8$ cm/h.

Les valeurs de $Z_f(t)$ ainsi calculées, à partir de l'équation (11) en fonction des valeurs mesurées de $R_f(t)$, sont comparées à celles mesurées (figure 4). Dans tous les cas, les résultats sont presque identiques ; en effet le coefficient de corrélation R^2 est toujours supérieur ou égal à 0,94 ; et l'écart $E = (Z_{fm} - Z_{fc})/Z_{fm}$ entre valeurs mesurées Z_{fm} et calculées Z_{fc} reste compris entre + 10 % et - 10 % (figure 5). Cependant, il faut noter que cet écart, relativement élevé au début (surtout en sol sableux ; de l'ordre de 10 %), diminue en cours d'infiltration, pour se stabiliser temporairement entre + 5 % et - 5 % (figure 5). Ceci pourrait être dû à une imprécision des valeurs de K_f , θ_s , θ_f et/ou θ_i , d'autant plus que les faibles valeurs de Z_{fm} , au début d'infiltration amplifient cette différence relative. Mais pour t supérieur à 10 h, les valeurs calculées s'écartent de celles mesurées surtout en sol sableux ($E \approx -10\%$ pour $q = 1$ L/h). Cette divergence pourrait être expliquée par une éventuelle surestimation de $K(h_f)$ ou par une imprécision des valeurs de θ_f et/ou θ_i . En sol limono-argileux cependant, les valeurs de $Z_f(t)$ calculées et mesurées semblent être identiques puisque l'écart entre celles-ci ne dépasse guère 4 %.

En tout état de cause, il semble que la précision de cette méthode diminue si la durée d'infiltration dépasse un certain temps car au fur et à mesure que ce dernier tend vers l'infini, $R_f(t)$ tend vers une limite finie, $Z_f(t)$ tend vers l'infini et l'infil-

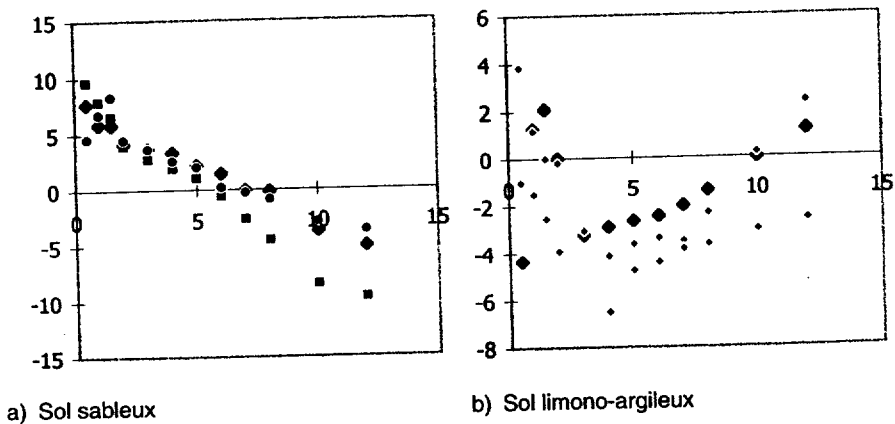


Figure 5 Écart entre les valeurs de $Z_f(t)$ calculées et mesurées.

Deviation between $Z_f(t)$ predicted and measured values obtained in sandy (a) and silty-clay soils.

tration de l'eau dans le sol tend vers un régime permanent. Or l'équation (11) ne permet pas de prévoir un tel comportement. De toute façon, la durée d'une irrigation localisée est dans la pratique de l'ordre de quelques heures.

5 – CONCLUSION

La prédiction de la profondeur maximale humidifiée au cours d'une infiltration ponctuelle, permet de limiter les pertes d'eau et d'engrais au-delà de la profondeur des racines.

Les résultats déduits de nos expériences ainsi que ceux d'autres recherches, mettent en évidence une étroite corrélation entre les dimensions (verticale et horizontale) du volume de sol humecté au cours d'une infiltration ponctuelle.

À partir d'essais au laboratoire menés sur deux types de sols et en utilisant les équations d'infiltration et de continuité, nous avons établi une relation permettant de déterminer la profondeur du front par une simple mesure de son rayon à la surface et ce connaissant la conductivité hydraulique et la teneur en eau au niveau du front en cours d'humectation ponctuelle.

Cette nouvelle méthode simple, précise et qui n'exige pas d'équipements importants, serait par conséquent d'un grand intérêt pratique pour améliorer l'efficacité d'application de cette technique d'irrigation.

Ces acquis incitent à poursuivre les études afin d'étendre le domaine d'application de cette approche dans des conditions plus réalistes où l'on tient compte de l'hétérogénéité du milieu, de l'évaporation à partir de la surface du sol et de la présence de la plante. En l'occurrence sa faible précision, pour des temps d'infiltration élevés serait sans conséquences notables sur la fiabilité des résultats puisque la durée d'une irrigation ne dépasse pas souvent une dizaine d'heures.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABABOU R., 1981. Modélisation des transferts hydriques dans le sol en irrigation localisée. Th. Doct.-Ing., Institut Polytechnique de Grenoble, 217 p.
- BRANDT A., BRESLER E., DINER N., BENASHER I., HELLER J., GODELBERG D., 1971. Infiltration from a Trickle Source : 1. Mathematical models. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35, 675-682.
- BRESLER E., HELLER J., DINER N., BENASHER I., BRANDT A., GALDBERG D., 1971. Infiltration from a Trickle Source : 2. Experimental Data and Theoretical predictions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35, 683-689.
- CINDY S. KAO, JAMES R. HUNT, 1996. Prediction of wetting front movement during one-dimensional infiltration into soil. *Water Resour. Res.*, 32, 55-64.
- CLEMENT T.P., WILLIAM R., WISE et FRED J. MOLZ, 1994. A physically based, two-dimensional, finite-difference algorithm for modeling variably saturated flow. *Journal of Hydrology*, 161, 71-90.

- HAVERKAMP R., ROSS P.J., SMETTEM K.R.J., PARLANGE J.Y., 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disk infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resour. Res.*, 30, 2931-2935.
- HEALY W., WARRICK A.W., 1988. A generalised solution to infiltration from surface soil point source. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 1245-1251.
- HILLEL D., 1988. L'eau et le sol ; principes et processus physiques. Traduit de l'anglais par Louis- W. De Backer. Louvain-la-neuve Académia.
- HILLEL D., GARDNER W.R., 1970. Transient infiltration into crust-topped profiles. *Soil Sci.*, 109, 69-76.
- KACHANOSKI R.G., VAN WESENBEEK I.J., VON BERDOLTI P., WARD A., HAMLEN C., 1990. Measurement of soil water content during three-dimensional axial-symmetric water flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 645-649
- KELLER J., BLIESNER RON D., 1990. Sprinkle and Trickle Irrigation. An AVI Book - Van Nostrand Reinhold. New York.
- LEVIN I., VAN ROOYEN P.C., VAN ROOYEN F.C., 1979. The effect of discharge rate and intermittent water application by point-source irrigation on the soil moisture distribution pattern. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 8-16.
- MICHELAKIS N., VOUGIOUCALOU E., CLAPAKI G., 1993. Water use, wetted soil volume, root distribution and yield of avocado under drip-irrigation. *Agric. Water Manage.*, 24, 119-131.
- RANDALL J. CHARBENEAU, 1988. Liquid moisture redistribution : Hydrologic simulation and spatial variability. H.J. Morel-Seytoux NATO ASI Series, 127-159.
- SMETTEM K.R.J., ROSS P.J., HAVERKAMP R., PARLANGE J.Y., 1995. Three-dimensional analysis of infiltration from the disk infiltrometer. 3. Parameter estimation using a double-disk tension infiltrometer. *Water Resour. Res.*, 31, 2491-2495.
- VAN GENUCHTEN M.T.H., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-897.
- VAUCLIN M., 1988. Flow of water and air in soils : theoretical and experimental aspects. H.J. Morel-Seytoux NATO ASI Series, 53-87.
- WARD A.L., KACHANOSKI R.G., ELRICK D.E., 1995. Analysis of water and solute transport away from a surface point source. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 699-706.