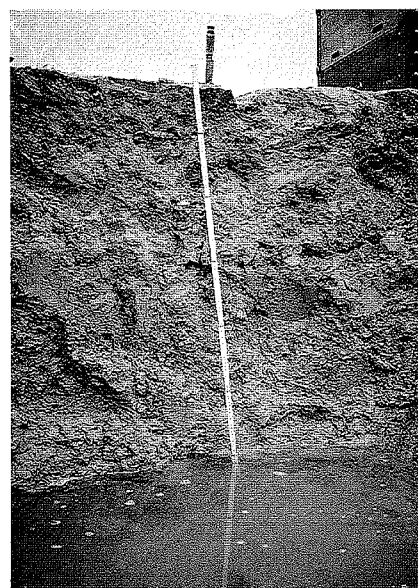


Remontée capillaire de l'eau souterraine*

U. SCHMIDHALTER et J.-J. OERTLI, Institut des sciences végétales de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich, CH-8315 Lindau

Résumé

La profondeur optimale du niveau de la nappe phréatique, déterminante pour la culture, varie en fonction de la composition du sol, du type de plante et des conditions climatiques. La vitesse et la hauteur de la remontée capillaire de l'eau souterraine doivent être connues en vue d'améliorer l'approvisionnement hydrique des plantes et d'optimiser l'irrigation. De plus, cette information est nécessaire lors de la conception d'installations d'irrigation et de drainage, par exemple pour le calcul de la distance entre les drains et de leur profondeur. En se basant sur cette connaissance, l'effet de l'exploitation de la nappe phréatique, comme par exemple son abaissement, peut être prévu plus précisément. Cette publication montre le mécanisme de la remontée capillaire qui dépend de la texture du sol. Des exemples de remontée capillaire dans des profils de sols à une ou plusieurs couches sont présentés.



*Traduction de l'article «Grundwasseraufstieg» paru dans *Landwirtschaft Schweiz* 1 (7), 405-410.

Le potentiel de rendement et les nécessités d'amélioration d'un sol influencé par la nappe phréatique sont dépendants de la profondeur de cette nappe et de la texture du sol. ▶

Introduction

Le rendement des cultures mises en place sur un site influencé par une nappe phréatique est fortement dépendant de la profondeur de celle-ci. Lorsque la nappe se trouve à proximité de ou dans la rhizosphère, le rendement peut diminuer à cause d'une mauvaise aération du sol. Ces sols sèchent mal, rendent le travail difficile et retardent souvent la levée des cultures.

D'un autre côté, lorsque le niveau de la nappe phréatique se trouve à une profondeur optimale, la plante est mieux pourvue en eau et le rendement peut augmenter sensiblement.

Mais si cette nappe se trouve en dessous de ce niveau optimal, la remontée capillaire dans la rhizosphère diminue et, dans certains cas, le rendement décroît. La baisse de productivité dépend

avant tout de la part que prend l'eau capillaire dans la diminution de l'approvisionnement en eau totale de la plante, lors de l'abaissement du niveau de la nappe phréatique.

Relation entre la profondeur de la nappe phréatique et le rendement

La relation entre la profondeur moyenne de la nappe phréatique et le rendement n'est pas la même pour tous les sols. Pour une intensité d'utilisation égale, elle dépend des critères suivants :

— de la remontée capillaire spécifique au sol ;

- de la capacité hydrique disponible pour les plantes, spécifique au sol. Elle donne la quantité d'eau dans la rhizosphère effectivement disponible pour la plante ;
 - des conditions météorologiques pendant la période de végétation, respectivement du bilan hydrique climatique. L'apport de l'eau capillaire au bilan hydrique de la plante est d'autant plus important que la quantité de précipitations est faible et que règnent des conditions sèches ;
 - du niveau d'approvisionnement en éléments nutritifs du sol et du niveau de fumure ;
 - de la forme d'utilisation : céréale, prairie, etc.
- Dans des conditions définies, le rap-

port entre le rendement et le niveau moyen de la nappe phréatique peut être caractérisé par quatre paliers. Dans la figure 1, la relation entre le rendement et le niveau moyen de la nappe phréatique est représentée pour un sol sableux (modifié selon RINGER *et al.* 1974).

Dans le premier palier, le rendement augmente dans un premier temps à cause de l'amélioration de l'aération du sol. Dans le deuxième palier, lorsque le niveau de la nappe phréatique se trouve à des profondeurs de 0,5 à 0,9 m

abaissement du niveau de la nappe de 50 à 100 cm a accru de 30% le rendement des carottes. Une baisse supplémentaire a provoqué une augmentation de 20%. Le manque de pores aérés de ce sol a agi négativement sur le rendement. De plus, ce sol riche en silt possède un taux de remontée capillaire très élevé, le niveau de la nappe phréatique peut donc être très bas. Selon la structure du sol et la culture en place, le niveau optimal de la nappe peut, selon des conditions climatiques données, varier très fortement.

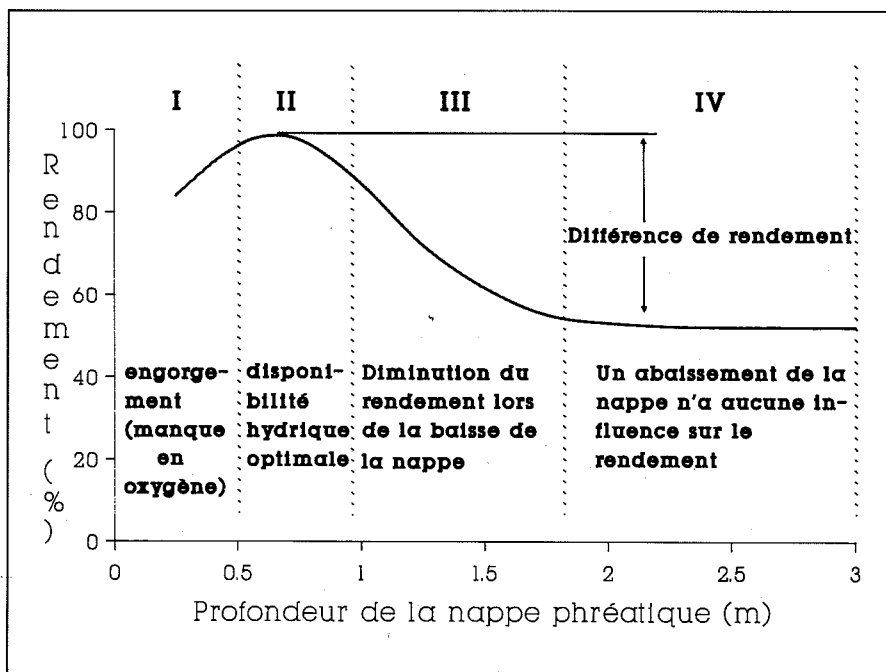


Fig. 1. Relation entre la hauteur moyenne du niveau de la nappe phréatique et le rendement du blé d'été sur un sol sableux.

où les conditions d'aération et de disponibilité en eau sont optimales, les meilleurs rendements sont réalisés.

Au troisième palier (0,9-1,8 m), le rendement diminue nettement lorsque la profondeur de la nappe augmente. L'approvisionnement hydrique de la plante diminue, car la remontée d'eau capillaire est réduite par la distance entre le niveau de la nappe phréatique et la rhizosphère.

Si le niveau de la nappe est encore plus bas (< 1,8 m), le rendement n'est plus du tout influencé par l'apport d'eau capillaire. La nutrition de la plante en eau provenant de la nappe phréatique est donc négligeable. Les effets négatifs d'un niveau trop élevé sont particulièrement marqués lorsque le sol est moyennement pourvu en éléments nutritifs (SCHMIDHALTER, 1986). Dans un sol silteux pauvre en nutriments, un

Pour RINGER *et al.* (1984), le rendement optimal dans un sol sableux (sable moyen, finement granuleux) est atteint avec une profondeur de 0,5 à 0,9 m au-dessous de la surface cultivée (SC). Pour un sol argileux (argile faiblement silteuse), ce niveau est de 0,9 à 1,3 m et pour un sol limoneux (limon silteux), de 1,4 à 1,8 m au-dessous de SC.

Pour des sols limoneux, l'influence de la nappe se fait encore sentir à des profondeurs de environ 3,3 m, alors que dans des sols argileux, cet effet ne se manifeste que jusqu'à des niveaux de 2 à 2,5 m au-dessous de SC. Les sols limoneux permettent le développement d'une rhizosphère effective plus importante et connaissent une remontée capillaire plus élevée que les sols argileux ou sableux. Le niveau de la nappe phréatique se trouve donc plus bas.

Objectif de l'étude

La connaissance du volume de la remontée capillaire est nécessaire pour :

- l'optimisation de l'équilibre hydrique de la plante ;
- la réalisation d'amendements comme la réduction de l'engorgement des sols, dû à l'eau de remontée capillaire, par le drainage. La connaissance du niveau optimal de la nappe est un critère primordial à prendre en considération lors de la planification de drainages et d'irrigations ;
- une irrigation efficace et économique par la régulation de la remontée capillaire ;
- l'estimation de l'effet d'amendements, comme la baisse du niveau de la nappe par le retrait d'eau souterraine ou la régulation du fleuve. Ces mesures peuvent dérégler l'approvisionnement en eau des plantes.

Pour apprécier l'effet de ces phénomènes, il est donc important de bien connaître les mécanismes de remontée capillaire.

Les mécanismes de la remontée capillaire

Les forces capillaires agissent de telle manière que l'eau contenue dans les pores fins du sol est retenue. Plus les pores sont fins, plus l'eau peut remonter vers la surface. Ainsi, l'eau remonte plus haut dans un sol argileux que dans un sol sableux. Le mouvement de l'eau dans les pores est décrit par la « loi de Darcy ». Elle dit que, dans un sol homogène, l'eau coule d'un endroit humide vers un endroit moins humide. L'humidité du sol peut aussi être exprimée à l'aide de la tension. Elle exprime la force avec laquelle l'eau est retenue dans le sol. Plus un sol est sec, plus la tension est élevée. L'optimum de l'approvisionnement en eau des plantes se situe entre 150 et 700 centimètres de colonne d'eau (CE) (environ 150-700 mbar). Avec des tensions plus élevées, le rendement baisse sensiblement. Il en va de même avec les tensions trop faibles ; le sol est trop humide et les plantes souffrent d'un manque d'oxygène (SCHMIDHALTER et OERTLI, 1987 et 1988). La force motrice qui engendre le mouvement de l'eau est la différence d'humidité ou de tension qui règne entre deux endroits. Plus cette différence est grande, plus l'eau est déplacée rapidement. A cela s'oppose la résistance du sol qui augmente lorsqu'il s'assèche

ou que la tension croît. Il y a donc des forces qui s'opposent. Dans un sol très sec, les forces de résistance dominent et le mouvement de l'eau est donc fortement ralenti.

Comme un sol argileux à pores fins oppose une plus grande résistance au flux hydrique qu'un sol sableux à gros pores, le déplacement de l'eau se fera plus rapidement dans le sol sableux à humidité comparable.

Dans un sol argileux, l'eau peut remonter très haut, mais à des vitesses très faibles. Dans un sol sableux, ce transfert est plus rapide, mais l'eau ne peut pas remonter aussi haut.

La loi de Darcy dit : $q = k(h) dH/dz$; où q est le flux, c'est-à-dire le taux de remontée capillaire en centimètres par jour ou millimètres par jour ; $k(h)$ est la conductivité hydrique, l'inverse de la résistance qui dépend de la tension (h) du sol ; dH/dz exprime le gradient hydrique, à savoir la force qui déplace l'eau d'un point A vers un point B. Si l'on connaît $k(h)$ spécifique au sol et la tension actuelle, on peut calculer le taux et la hauteur de la remontée capillaire pour chaque sol et chaque profondeur de la nappe (BRANDYK et WESSELLING, 1985 ; BLOEMEN, 1980 ; GIESEL *et al.*, 1972 ; RINGER *et al.*, 1984 ; SCHINDLER *et al.*, 1982 ; SCHMIDHALTER, 1986).

En principe, le processus de remontée capillaire est le même pour un sol cultivé que pour un sol nu. Malgré tout, il existe quelques différences importantes. Pour un sol nu, on constate trois phases dans la remontée capillaire (SCHMIDHALTER, 1986) : la première phase est caractérisée par un taux d'évaporation, respectivement de remontée capillaire, constant. C'est une phase limitée par l'énergie. Lorsque le sol ne peut plus transporter l'eau assez rapidement pour utiliser l'énergie présente, la deuxième phase commence. Elle est caractérisée par une chute constante du taux d'évaporation. C'est une phase limitée par le sol. La cause de ce recul vient du fait que les surfaces sèches des couches du sol opposent une grande résistance au mouvement de l'eau. Lorsque le taux d'évaporation est très petit, la troisième phase commence. Elle est caractérisée par un taux de remontée capillaire très faible. Le taux de remontée est très fortement réduit par un couche superficielle sèche, qui n'a souvent que quelques millimètres d'épaisseur. Cet effet peut aussi être atteint par un piochage de surface. C'est une mesure permettant d'économiser l'eau car la capillarité est rompue. Les précipitations rétablissent la remontée capillaire et ce travail doit être à nouveau effectué.

Dans un sol cultivé, la couche superficielle sèche est traversée par les racines qui peuvent atteindre des couches profondes et humides. L'évaporation est ici principalement réglée par les besoins de l'atmosphère, respectivement par la quantité d'eau nécessaire à la plante, à un certain stade de son développement. Dans un sol cultivé, on constate donc une remontée capillaire beaucoup plus importante (SCHMIDHALTER, 1986).

Remontée capillaire dans un profil à une seule couche

En se basant sur la loi de Darcy et sur la connaissance de la conductivité hydrique spécifique du sol, il est possible de calculer la remontée capillaire pour n'importe quel sol et de faire un pronostic des effets d'amendements sur la nappe. Sur la figure 2, la remontée capillaire d'un sol silteux est calculée. La terre analysée contient 19% de sable, 75% de silt et 6% d'argile. La teneur en matière organique est de 0,6% et la densité apparente de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$. Cette figure montre la relation entre la hauteur de la remontée capillaire, la quantité d'eau mise à disposition (q) et la tension régnant sous la rhizosphère nécessaire à transporter la quantité d'eau donnée dans la rhizosphère. Une forte tension de 315 cm CE (315 mbar) suffit à fournir 0,1 cm d'eau par jour, lorsque le niveau de la nappe se trouve à 250 cm de profondeur. Si la tension est augmentée jusqu'à 725 cm CE, 1 cm

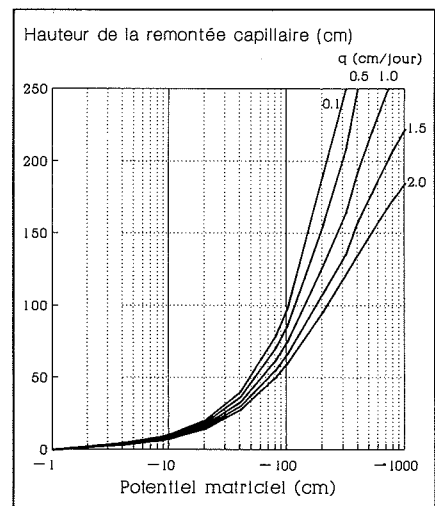


Fig. 2. Hauteur de la remontée capillaire en fonction de la tension et du taux de remontée (q), dans un sol silteux.

d'eau peut être fourni. Pour une tension de 1000 cm CE, ce sol peut encore fournir 2 cm d'eau par jour, lorsque la nappe se situe à 170 cm de profondeur. Les taux de remontée calculés montrent que ce sol peut fournir en très peu de temps d'importantes quantités d'eau. Ces taux ont été confirmés expérimentalement (SCHMIDHALTER, 1986). Si l'on part du principe que la plante utilise en moyenne 5 mm d'eau par jour, la quantité d'eau fournie par ce sol suffit même lorsque le niveau de la nappe phréatique est plus bas que 250 cm. Une augmentation continue de la tension ne peut cependant pas augmenter indéfiniment le taux de remontée capillaire. Chaque sol atteint à un certain moment un taux de remontée spécifique que même une tension

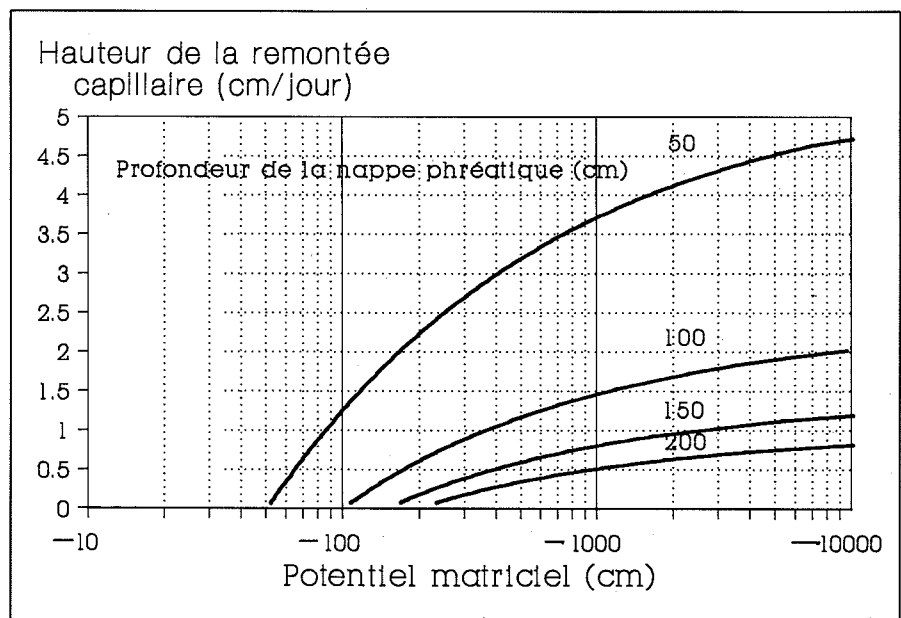


Fig. 3. Hauteur de la remontée capillaire dans un sol silteux, en fonction de la profondeur de la nappe phréatique et de la tension.

plus élevée ne peut plus augmenter, à cause des résistances au flux dans le sol. Cette relation est représentée dans la figure 3.

Les taux de remontée capillaire diminuent quand le niveau de la nappe baisse. Lorsque la tension augmente, on s'approche d'une valeur limite. Ce seuil est en réalité atteint avant car, dans un sol très sec, le mouvement de l'eau ne s'effectue que sous forme de vapeur. Pour des taux semblables, ce mouvement est plus lent que le transfert d'eau sous forme liquide. Il faut remarquer que le sol étudié est un cas extrême, car presque tous les autres types accusent un taux de remontée capillaire plus faible.

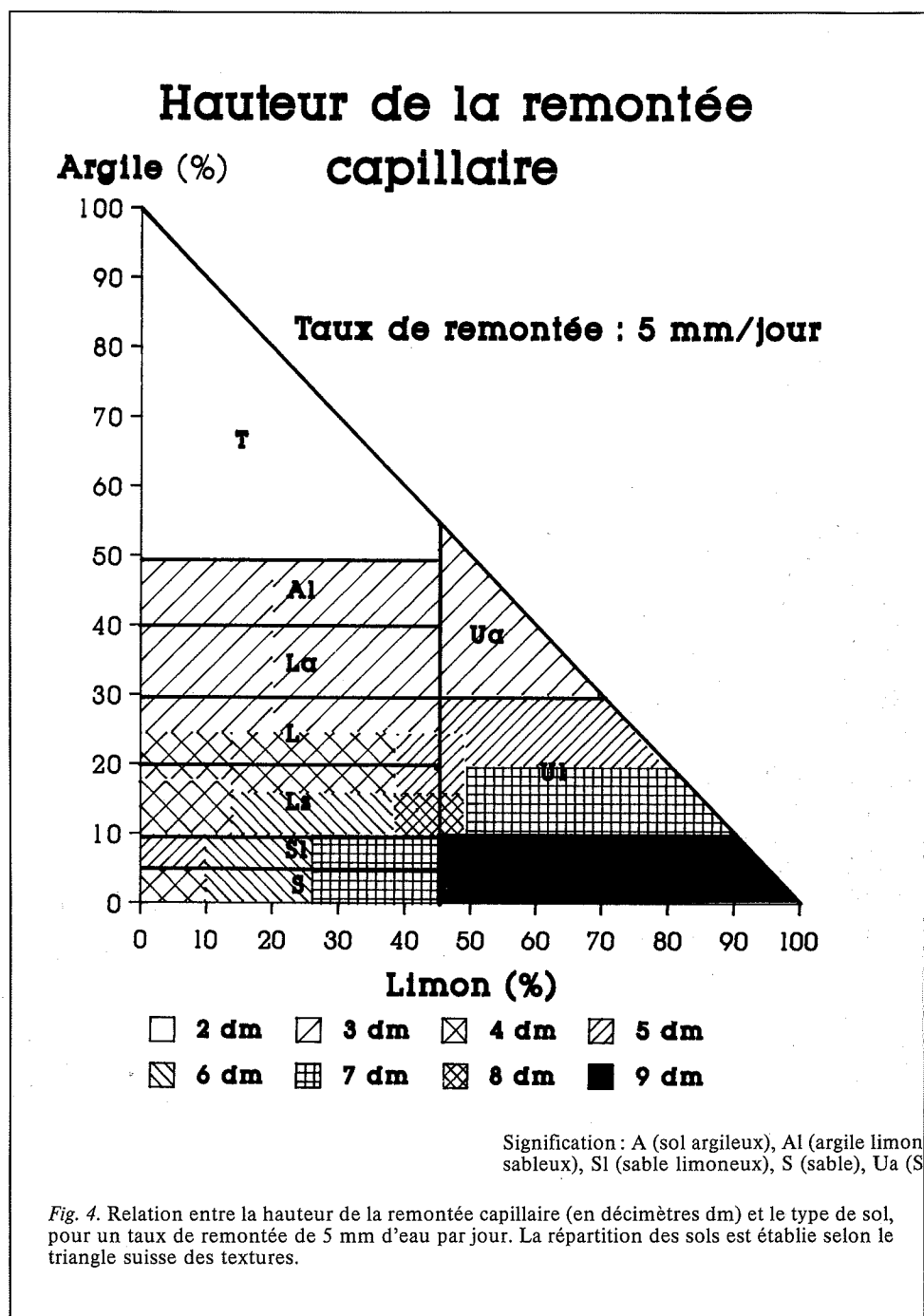
Les taux de remontée capillaire de différents sols peuvent servir de base à une classification. Les figures 4 et 5 montrent les relations entre les hauteurs de remontée capillaire et le type de sol pour des taux de 5 et 0,2 mm/jour. Ces représentations ont été établies avec les données de GIESEL *et al.* (1972), RENGER *et al.* (1984), SCHINDLER et DANNOWSKI (1982) et de SCHMIDHALTER (1986) et des résultats d'essais non publiés.

Pour un taux de remontée de 5 mm/jour, la tension de la limite inférieure de la rhizosphère effective a été suppo-

Tableau 1. Relation entre la hauteur de la remontée capillaire et une augmentation de la teneur en argile du sol, pour des taux de remontée capillaire de 2 mm/jour et une tension de 1000 cm dans un sol argileux.

Teneur en argile (%)	Hauteur de la remontée capillaire pour un taux de remontée de 2 mm/jour (cm)
50	139
60	67
70	37
80	27
90	19

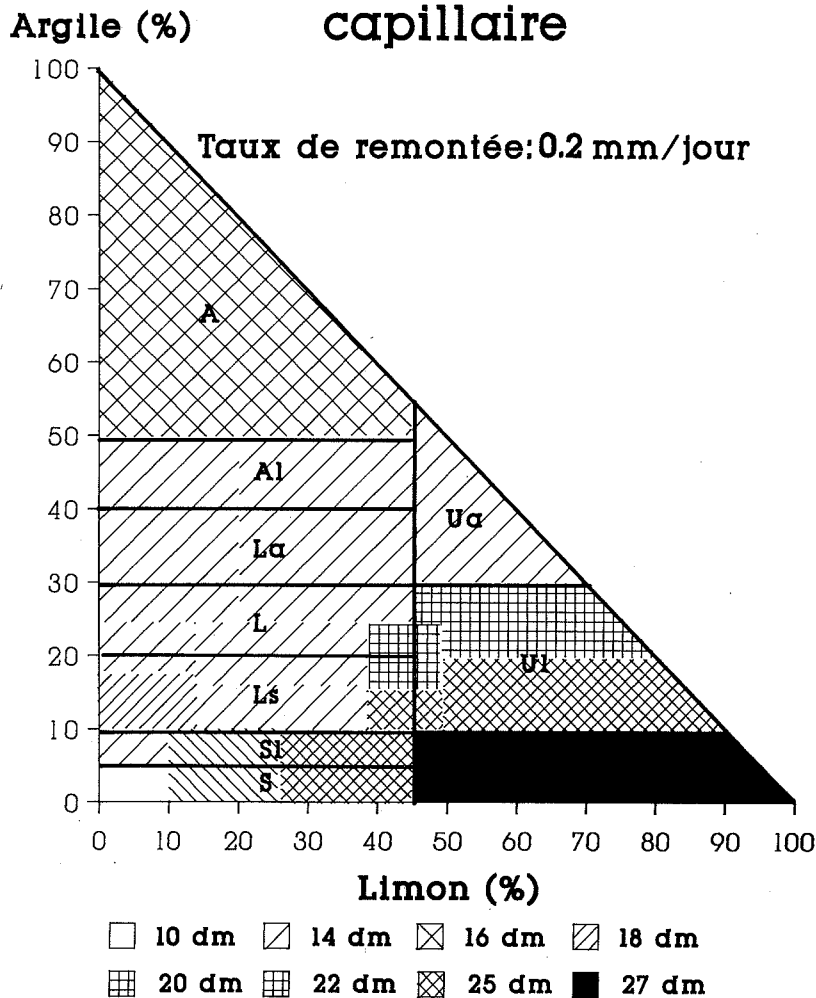
sée entre 120-170 cm CE et celle pour 0,2 mm/jour à 10 000 cm CE; cette tension a été mesurée dans un sol très sec, dans lequel les plantes éprouvent beaucoup de difficultés à extraire de l'eau. RENGER et STREBEL (1976) indiquent la limite du taux de disponibilité hydrique capillaire encore efficace pour la plante à 0,2 mm d'eau par jour. Pour la représentation de la relation entre le type de sol et la remontée capillaire, on a choisi le triangle suisse des textures, avec ses pourcentages de sable, silt et argile. Sur ces représentations, il est possible de lire la hauteur de remontée qui peut être atteinte



dans un type de sol bien déterminé. La relation entre la hauteur et le taux de remontée capillaire, permet de constater des variations nettes entre les différents types de sol. La hauteur de la remontée, par exemple, diminue lorsque la teneur en argile du sol augmente. BLOEMEN (1980) propose un exemple clair (tabl. 1). Ce tableau montre que la hauteur de la remontée capillaire, pour un taux de remontée de 3 mm/jour, décroît rapidement en fonction de l'augmentation de la teneur en argile du sol. Il est entendu que l'importance de la part d'argile dépend aussi très fortement de l'épaisseur de la couche

d'argile. Lorsque la teneur en argile est de 90% et que l'épaisseur de la couche est supérieure à 50 cm, un flux de 2 mm/jour n'atteindra pas la limite inférieure de la rhizosphère supposée à 30 cm. Lorsque la teneur en argile est de 60%, cette condition est remplie seulement pour une couche d'une épaisseur supérieure à 97 cm. Dans les figures, on remarque aussi que des sols argileux et limoneux peuvent fournir des taux de remontées de 5 mm/jour seulement à des niveaux limités, alors qu'ils ont la possibilité de transporter des taux plus faibles à des niveaux plus élevés.

Hauteur de la remontée capillaire



euse), La (limon argileux), L (limon), Ls (limon argileux), U (silt limoneux), U (silt).

Fig. 5. Relation entre la hauteur de la remontée capillaire (en décimètres dm) et le type de sol pour un taux de remontée de 0,2 mm d'eau par jour.

Des substrats plus légers, tels que le sable ou le sable limoneux, offrent une disponibilité hydrique plus élevée. Le groupe des sols à sable limoneux a un taux de remontée encore meilleur que le sable pur. Un tel sol transporte 0,2 mm d'eau par jour 1,4 fois plus haut qu'un sol sableux. Lorsque le taux est de 5 mm d'eau par jour, il peut transporter cette eau 3 fois plus haut. Dans un sol sableux, la hauteur de remontée avec des mêmes taux n'augmente plus beaucoup pour des tensions supérieures à 100 cm, car la conductibilité hydrique est très basse. Pour des sols à silt argileux et à argile

silteuse, le niveau de remontée augmente encore pour des tensions supérieures à 100 cm CE. Les sols peuvent donc être classés en fonction de leur texture, selon le taux et le niveau de remontée capillaire. Pour un sable graveleux, un sable moyen et une argile, ainsi que pour une argile silteuse, les hauteurs de remontée sont particulièrement faibles. Des taux de remontée plus importants sont atteints dans des sables limoneux et des silts argileux (loess); les plus élevés sont observés dans des sols silteux. Pour des types de sol semblables, la hauteur de la remontée capillaire est

dépendante de la densité de tassement resp. du volume total des pores. La hauteur de la remontée diminue avec l'augmentation de la densité de tassement (GIESEL *et al.*, 1972).

Remontée capillaire dans un profil stratifié

Normalement la remontée capillaire est déterminée par la séquence des couches du sol. A part la disposition et le type de couches, le niveau de la nappe phréatique est également d'une importance primordiale pour la hauteur et le taux de remontée capillaire. Les deux exemples suivants illustrent ce fait.

Le sol choisi se compose d'une couche de 67 cm de limon sableux qui recouvre une couche épaisse d'argile. Les conséquences d'une baisse de la nappe de 80 à 100 cm, respectivement 120 cm de profondeur, sont indiquées dans le tableau 2. Les résultats sont donnés pour deux taux de remontée (q) (BLOEMEN, 1980). Si le niveau de la nappe phréatique est proche ou dans la couche supérieure, l'influence de l'eau capillaire sur le bilan hydrique de la plante est importante. Mais, lorsque ce niveau est inférieur à 100 cm, l'apport d'eau capillaire vers la couche supérieure est négligeable.

La remontée capillaire dépend aussi très fortement du niveau de la nappe phréatique. Les couches possédant les plus faibles conductibilités hydriques sont limitantes. Le niveau de la nappe phréatique est presque aussi important pour une couche souterraine d'argile que pour une couche de sable. La raison en est que dans un sol sableux la conductibilité hydrique diminue très rapidement.

Si la conductibilité hydrique (k) pour une tension de 5 cm est de 258 cm/jour, pour une tension de 100 cm, elle

Tableau 2. Influence de la profondeur de la nappe phréatique sur la hauteur maximale de la remontée capillaire, dans un sol composé d'une couche de 67 cm de limon sableux recouvrant une couche d'argile.

Profondeur de la nappe phréatique cm	Taux de remontée	
	$q = 0,1$ cm/jour	$q = 0,5$ cm/jour
	Hauteur maximale de la remontée (cm)	
80	69	40
100	30	15
120	29	15

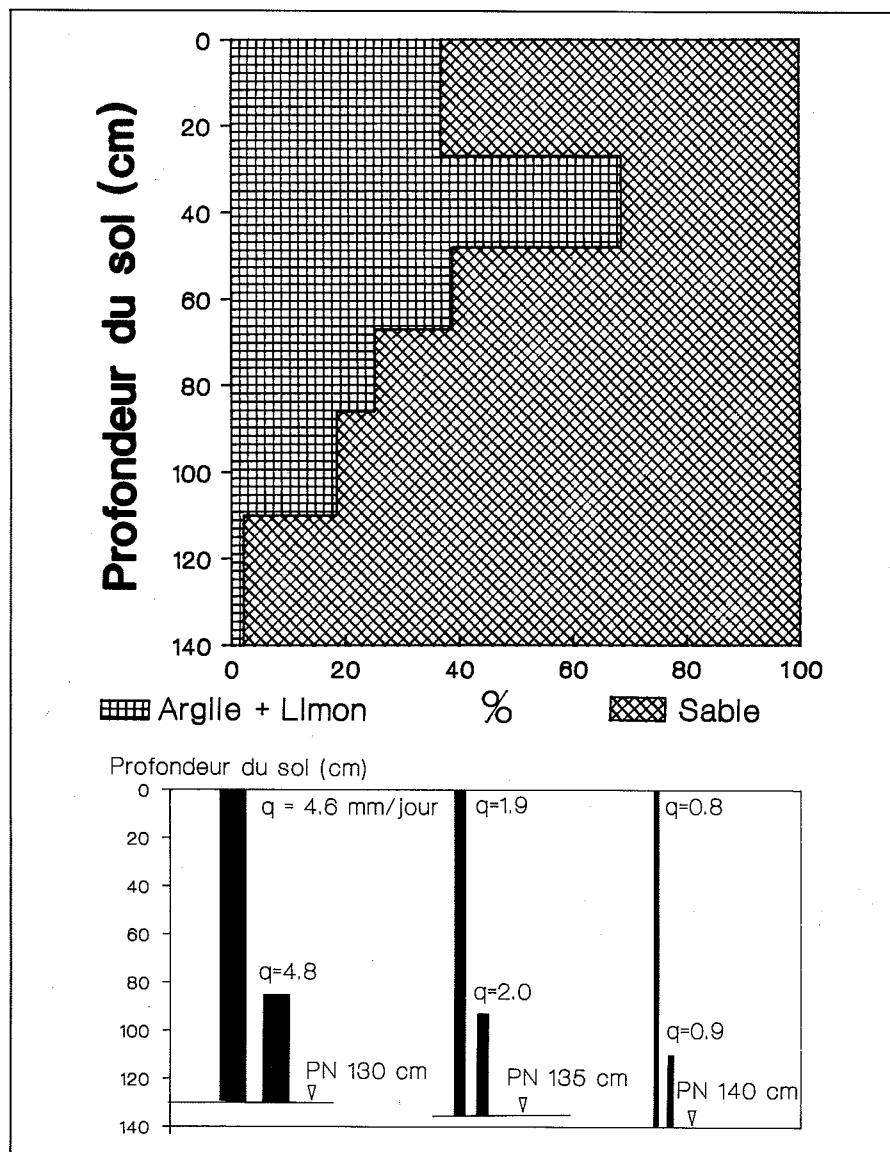


Fig. 6. Influence d'un abaissement de la nappe phréatique dans un sol sableux sur le taux de remontée capillaire (q). La figure supérieure donne la répartition granulométrique du sol. La représentation inférieure donne les hauteurs maximales de la remontée capillaire (hauteur des traits pleins) pour différents taux de remontée (épaisseur des traits).

diminue à 0,00027 cm/jour. L'effet d'une couche sableuse sur les propriétés capillaires d'un sol composé de six horizons où le niveau de la nappe phréatique baisse, est représenté sur la figure 6. Lorsque le niveau de la nappe se trouve à 130 cm, le taux de remontée capillaire est de 4,6 mm d'eau par jour pour une tension de 600 cm. Un flux de 4,8 mm atteint encore une hauteur de 70 cm au-dessous de la surface cultivée. Si le niveau de la nappe phréatique n'est baissé que de 5 cm, le flux hydrique jusqu'à la surface n'est plus que de 1,9 mm/jour. Un abaissement de 5 cm supplémentaires réduit ce flux à 0,8 mm/jour. Un flux de 0,6 mm/jour ne dépasse pas la sixième couche. Celle-ci est responsable de la diminution de la remontée capillaire de l'eau souterraine.

Remerciements

Les auteurs remercient Michel Evéquo pour la traduction française de ce texte.

Bibliographie

- BLOEMEN G. W., 1980. Calculation of steady state capillary rise from the groundwater table in multi-layered soil profiles. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 143, 701-719.
- BRANDYK T. and WESSELING J. G., 1985. Steady state capillary rise in some soil profiles. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 148, 54-65.
- GIESEL W., RENGER M. und STREBEL O., 1972. Berechnung des kapillaren Aufstiegs aus dem Grundwasser in den Wurzelraum unter stationären Bedingungen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 132 (1), 17-30.
- RENGER M., STREBEL O. und SPONAGEL H., 1984. Einfluss von Grundwasserabsenkungen auf den Pflanzenertrag landwirtschaftlich genutzter Flächen. *Wasser und Boden* 36 (10), 499-502.

SCHINDLER U. und DANNOWSKI R., 1982. Untersuchungen zum kapillaren Wasseraufstieg aus dem Grundwasser. 1. Mitteilung: Methodik zur Quantifizierung des kapillaren Wasseraufstiegs. *Arch. Acker- und Pflanzenbau und Bodenk., Berlin* 26 (3), 125-132.

SCHMIDHALTER U., 1986. Bodenversalzung im Unterwallis. Ursachen, Mechanismen und Meliorationsmassnahmen. Diss. Nr. 8052, ETH Zürich, 271 S.

SCHMIDHALTER U. und OERTLI J. J., 1987. Beiträge zur Wasseraufnahme der Wurzeln. Mitteiln. *Dtsch. Bodenk. Gesellsch.* 53, 467-472.

SCHMIDHALTER U. und OERTLI J. J., 1988. Beiträge zur Wasserversorgung auf die Ertragsleistung von Kulturpflanzen im Jugendstadium. *Bulletin Bodenk. Gesellsch. Schweiz* 12, 257-262.

Summary

Groundwater capillary rise

Optimum groundwater depth for plant production varies as a function of soil composition, crop type and climatic conditions. The rate and height of capillary rise from groundwater table must be known for optimization of plants' water supply and improvement of irrigation efficiency. This information is further required for designing drainage or irrigation systems and for calculating drain- or ditch-spacings, as well as their depths. Based on this knowledge the effects of groundwater level can be predicted more precisely.

In this paper, the mechanism of capillary rise and its dependence on soil texture are shown. Examples of capillary rise in single-layered and multi-layered soil profiles are presented.

Zusammenfassung

Grundwasseraufstieg

Je nach Zusammensetzung des Bodens, aber auch in Abhängigkeit der angebauten Kulturen, kann die optimale Grundwassertiefe unter gegebenen klimatischen Bedingungen stark variieren.

Die Kenntnis der Höhe des kapillaren Wasseraufstiegs aus dem Grundwasser ist erforderlich für die Optimierung des pflanzlichen Wasserhaushalts, die Gewährleistung eines sparsamen und effektiven Wassereinsatzes bei der Beregnung, die Durchführung meliorativer Massnahmen, beispielsweise Drainierungs- und Bewässerungsprojekte, und für die Abschätzung der Auswirkungen von Massnahmen wie Absenkung des Grundwasserspiegels durch Grundwasserentnahme oder Flussregulierung.

Der Mechanismus des kapillaren Wasseraufstiegs wird erklärt und die Bedeutung der Zusammensetzung des Bodens beim kapillaren Wasseraufstieg dargestellt. Für Einschnitt- und Mehrschichtprofile verschiedener Bodentypen wird die Höhe des kapillaren Wasseraufstiegs bei verschiedenen Aufstiegsraten angegeben.