

Analyses tensiométriques appliquées au pilotage d'irrigation

Rémi Gaudin, Mamisoa Rapanoelina, Philippe Oriol

Richards [1] au cours du 7^e Congrès international de la science du sol (1960) situe la tensiométrie dans les sciences agronomiques : « Quand on travaille sur l'eau du sol, l'instrument de base est le tensiomètre ; il l'est comme le voltmètre pour l'électricien, et ceci pour des raisons entièrement analogues ». Et aussi « Pour beaucoup de cultures, les régimes d'irrigation peuvent être spécifiés simplement en termes de mesures tensiométriques. La succion lue sur un instrument est plus pertinente que le contenu en eau du sol, pour qui vise le contrôle de l'arrosage ». Dans la pratique, un appareil est installé dans la zone de plus forte densité racinaire, un autre très en dessous [2]. L'arrosage est déclenché par le dépassement d'une valeur seuil de succion ; le temps d'arrosage – donc la dose apportée – est calculé pour que le sol reste aussi sec que possible en profondeur. Il en résulte un relevé tensiométrique en dents de scie (figure 1).

La même démarche est approfondie, ici, pour une culture de canne.

R. Gaudin : Secrétariat d'État à la Coopération, 57, boulevard des Invalides, 75700 Paris.

M. Rapanoelina : Fonds d'Intervention pour le Développement, Mahajanga 401, Madagascar.

P. Oriol : CIRAD-CA, Station de Roujol, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe, France.

Tirés-à-part : R. Gaudin, La Ville ès-Normands, 35190 Saint-Pern, France.

La méthode tensiométrique et son évolution

Le tensiomètre a une longue histoire. L'un de ses inventeurs fut Korneff, chercheur russe immigré en France. Son appareil [3] est composé d'un tube poreux (bougie) avec un fond, relié par un ajustage hermétique à un réservoir en verre qui communique avec un manomètre à mercure placé à l'air libre. Entre l'eau du réservoir et le mercure du manomètre il y a un espace plein d'air. Korneff préconisait pour la fabrication

de la bougie l'emploi « d'une matière poreuse perméable à l'eau et imperméable à l'air lorsqu'elle est imbibée d'eau ». Les matériaux proposés sont la craie, le plâtre et l'argile cuite.

Bordas et Mathieu [4] (figure 2) ont amélioré considérablement ce prototype en supprimant tout volume d'air interne et en utilisant de l'eau bouillie (pas de bulle d'air). La bougie est en porcelaine sans couverture feldspathique et présente une « force de succion » suffisante pour éviter le décrochage (chute brutale du niveau de mercure suite à l'entrée de l'air dans la bougie humide). Cette force, que l'on appelle aujourd'hui la « pression d'entrée d'air », peut être augmentée par colmatage partiel des pores. L'appareil permet de suivre « l'assimilation de l'eau du sol en place, car ce n'est pas le taux d'humidité de la terre qui importe aux racines des plantes, mais la force avec laquelle l'eau est retenue par le sol ».

Depuis, les progrès ont surtout consisté en l'emploi de matière plastique et de tube nylon pour assurer la jonction hydraulique entre bougie et réservoir à mercure (figure 3). La lecture du potentiel de l'eau du sol se fait souvent sur une planche manométrique qui peut accueillir les informations en provenance de plusieurs tensiomètres (photo 1). L'amélioration de la qualité des bougies, surtout en ce qui concerne la pression d'entrée d'air, a permis de réduire considérablement les risques de décrochage. Seul l'emploi d'eau désaérée reste un impératif contraignant pour des essais menés assez loin d'une station.

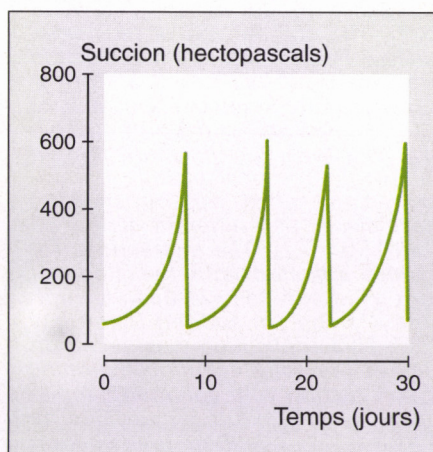


Figure 1. Évolution de la succion mesurée par le tensiomètre à faible profondeur : relevé en dents de scie.

Figure 1. Time-course of suction as measured by a top-soil tensiometer.

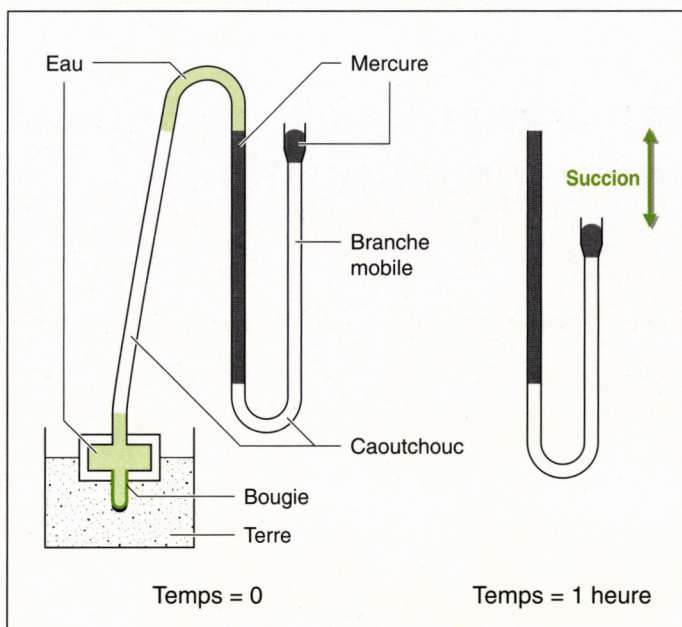


Figure 2. Mesure tensiométrique avec l'appareil de Bordas-Mathieu. Après implantation de la bougie dans la terre, le branche mobile est descendue pour maintenir constant le niveau de mercure (à gauche) ; à l'équilibre, la différence de hauteur de mercure définit la succion du sol.

Figure 2. Measurement of soil suction with a Bordas-Mathieu apparatus.

Le manomètre de type Bourdon est parfois utilisé à la place de la colonne de mercure, mais sa précision est moindre. Les capteurs de pression électroniques ont l'avantage de permettre l'automatisation. Dans le langage moderne, le tensiomètre

permet la mesure du potentiel matriciel de l'eau du sol (l'opposé de la succion) dont l'unité est le joule par kilogramme d'eau. Toutefois, comme l'eau est incompressible, on peut remplacer dans l'équation aux dimensions du potentiel

la masse par un volume, c'est-à-dire une longueur au cube. Le joule par kilogramme d'eau équivaut ainsi à une pression de 1 kilopascal, elle-même équivalente à une hauteur de 10 centimètres d'eau. La succion et donc le potentiel matriciel sont égaux à zéro lorsque l'eau est libre (cas de la surface d'une nappe phréatique). L'eau du sol étant liée, son potentiel matriciel est négatif. Bien que des valeurs très négatives du potentiel matriciel soient atteintes dans des sols secs, celles-ci restent dans la pratique hors de portée de la mesure tensiométrique, car le manomètre à mercure ne peut dépasser la valeur zéro en pression absolue (ou -1 atmosphère en pression relative par rapport à la pression atmosphérique). La limite de mesure va donc dépendre de l'altitude et de la température. En effet, le circuit étant rempli d'eau, on ne peut aboutir au vide mais à la pression de vapeur saturante de l'eau, qui est très dépendante de la température [5, 6]. Ainsi, au niveau de la mer et à $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, la succion maximale obtenue est $1\text{ atm} - 0,07\text{ atm}$, soit environ 930 hPa (hectopascal). À moyenne altitude où règneraient une pression de $0,9\text{ atm}$ et la même température, la limite serait 830 hPa . Une autre raison est l'influence de la profondeur de la bougie qui abaisse d'autant la limite d'emploi : ainsi à 50 cm de profondeur va correspondre une diminution de 50 hPa . Richards [1, 5] cite souvent comme limite pratique la valeur de 850 hPa , valeur très en deçà du point de flétrissement permanent des végétaux ($15\ 000\text{ hPa}$ environ). Il ne faut cependant pas en conclure que le tensiomètre est inapproprié au suivi de l'eau du sol utile aux cultures. Pour des terres assez riches en sables fins, la plage de fonctionnement du tensiomètre couvre plus de la moitié de l'intervalle d'humidité entre capacité de rétention et point de flétrissement ; cette proportion atteint 90% pour des sables grossiers [5]. De plus, la conductivité hydraulique baisse rapidement lorsque la succion du sol augmente. Les flux d'eau, fonction de cette conductivité, ont donc tendance à diminuer considérablement pour les succions sortant du domaine tensiométrique. En conséquence, le tensiomètre à mercure s'avère être un bon outil pour les recherches en irrigation [7] qui concernent le plus souvent des sols légers.

Sur cette base, deux orientations sont données à notre étude : la première est didactique, l'autre vise à la modélisation.

Summary

Tensiometric analyses applied to irrigation management

R. Gaudin, M. Rapanoelina, P. Oriol

Tensiometers first began being developed 60 years ago with the Bordas-Mathieu apparatus (Figure 2), which provided a model for the design of present day devices (Figure 3 and Photo 1). The soil suction of tensiometers ranges from 0 to 850 hectoPascals (hPa). This is only a small fraction of the suction range within which soil moisture is available for plant growth. However, in the finest textured soils, tensiometers cover about half of the moisture content range between field capacity and wilting. This explains why tensiometers are commonly used for irrigation management (Figure 1). In the present experiments, a two-dimensional vision of water movement (Figures 10 and 11) under sugarcane crops was obtained by measuring soil suction with 30 tensiometers placed at 5 different depths on both sides of a sugarcane line (Figure 9 and Photo 2). The instructions for tensiometric management of irrigation were adjusted with the stage of plant growth (Figure 8). Tensiometers were used in a zone of deep ferruginous soils with a sandy-silt texture (Figure 4). The generalized Darcy law was applied to calculate vertical water flow. This application was based on prior measurement of hydraulic properties of the soil, including hydraulic conductivity (Figure 6) and the relation of soil suction with volumetric moisture (Figure 7), at a nearby site with comparable soil texture (Figure 5). The experimental time-course of suction (Figure 12) indicated that suction rapidly increased after wetting by irrigation. Its analysis, with reference to the characteristic soil-moisture curve (Figure 13), led to the conclusion that water was readily available under the suction threshold (500 hPa) chosen for irrigation onset.

Cahiers Agricultures 1998 ; 7 : 131-8.

Milieu naturel, matériels et méthodes

Le cadre de travail

L'expérimentation a été menée sur l'exploitation agricole de la Siranala, sigle désignant en langue malgache la culture de la canne à sucre à Analaiva. Cette localité est située à 20 kilomètres de Morondava, sur la côte ouest de la Grande Île. Le climat est semi-aride avec des pluies concentrées de décembre à la mi-avril. Le baobab domine la végétation des zones non défrichées ou protégées. La culture de la canne à sucre nécessite une irrigation importante durant la longue saison sèche. Trente-trois rampes pivotantes arrosent autant de plots circulaires, qui occupent au total 2 400 hectares. Le plot B7 (figure 4) a été retenu pour l'essai de pilotage tensiométrique en raison de plusieurs avantages : représentativité dans la distribution des sols, relative proximité de la station de recherche agronomique et disponibilité après récolte de cannes vierges à la fin juin 1988. La culture dure douze mois, du début de repousse cinq mois avant les premières pluies à la coupe dans la saison sèche qui suit.

Les sols et leurs propriétés hydrodynamiques

Les sols sont ferrugineux tropicaux dans leur très grande majorité. Bien que désignés sous le vocable de « sables roux », ils sont souvent limono-sableux. Leurs qualités hydrodynamiques sont bien connues depuis les travaux de Marini et son équipe [12] : sur les trois parcelles qu'ils ont étudiées, l'une présente un profil textural très proche (figure 5) du site d'implantation des dispositifs tensiométriques. Les données de cette parcelle (Analaiva I défriche) font ressortir la grande conductivité du sol (figure 6) ainsi que sa difficulté à retenir l'eau (figure 7). Jourdan [13] a montré que la notion de capacité de rétention n'avait guère de sens ici, puisque le sol perd encore beaucoup d'eau au voisinage de cette valeur d'humidité. Les données hydrodynamiques permettent un calcul simple : après une forte pluie, la succion doit

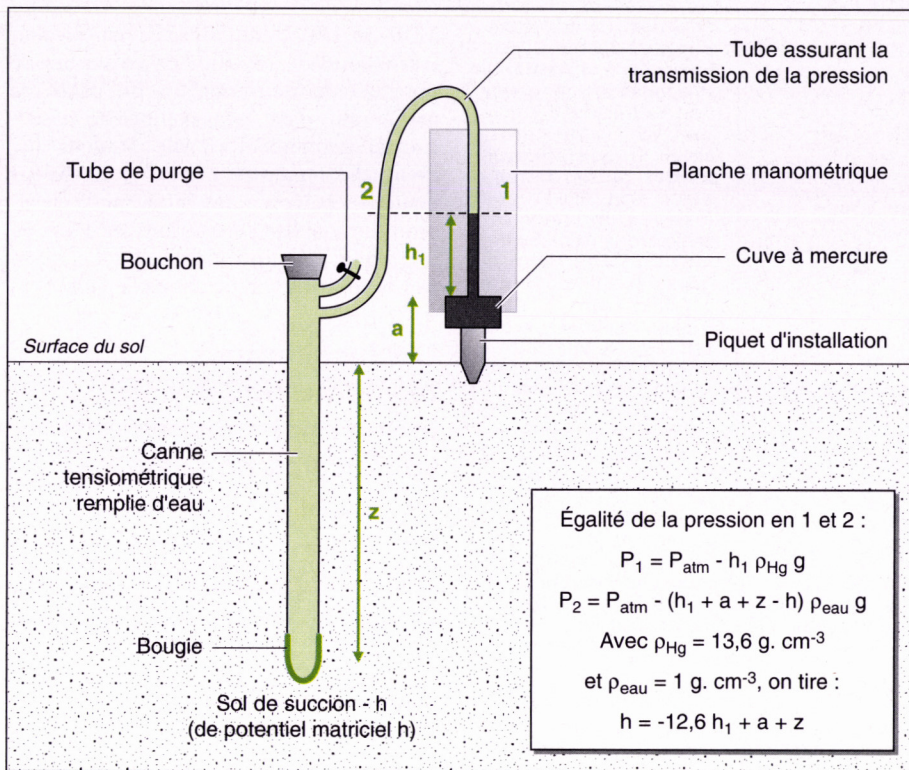


Figure 3. Suivi de la succion du sol avec un tensiomètre en place.

Figure 3. Tensiometric soil suction measurement.

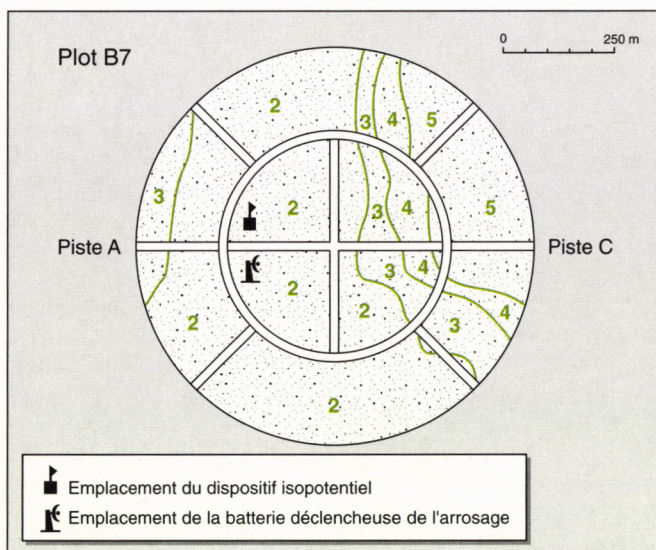


Photo 1. Planche manométrique recueillant les informations de cinq tensiomètres.

Photo 1. Five tensiometers on the same mercury flask.

Les agronomes mésestiment parfois le rôle des mouvements souterrains de l'eau dans la réponse de la plante à l'arrosage. Or cette problématique est loin d'être secondaire pour la canne à sucre en phase de maturation. En outre, l'évaluation de ces flux profonds [8-10] et leur estimation délicate [11] (hypothèse de verticalité difficile à vérifier) réservent peu de place aux flux obliques.

Les résultats ont été obtenus dans un cadre privilégié : sols profonds de texture fine et aux caractéristiques hydrodynamiques bien définies, climat semi-aride, culture très consommatrice d'eau (canne à sucre), système d'irrigation performant (pivot), pilotage par tensiomètres. Ils conduisent à une représentation simple du fonctionnement hydrique du système sol-canne en condition d'arrosage presque limitant.



texture grossière à moyenne ; 5 : sols hydromorphes minéraux ou peu humifères à gley de profondeur, sur sables roux à pseudo-gley dès la surface de texture grossière à moyenne.

Figure 4. Pedological map of the B7 sector in Analaiva (Madagascar).



Photo 2. Tensiomètres pour l'obtention des courbes d'isopotential sous canne à sucre.

Photo 2. Tensiometers for the study of water movement under sugarcane.

approcher 500 hPa pour que le flux de percolation devienne négligeable ($0,5 \text{ mm.j}^{-1}$) au regard de la consommation moyenne de la canne. L'humidité volumique correspondante est de 10 %, le stock hydrique disponible est donc très limité. Le problème ainsi posé est celui de la conduite de l'irrigation en dehors de la saison des pluies.

Le pilotage tensiométrique des arrosages

La vitesse d'avancement de la rampe d'irrigation détermine la dose apportée. La vitesse minimale est évitée, car elle correspond à une dose de 40 mm susceptible de conduire à des percolations importantes

[14]. Bien que cela implique une mise en route plus fréquente, la vitesse est réglée pour donner une dose de 20 mm en début de repousse de la canne (ou de démarrage de la plantation de vierge) et pendant sa pleine croissance. Avant récolte, cette dose est réduite à 12 mm afin de favoriser la maturation. Les indications en provenance d'une batterie de cinq tensiomètres située dans la zone de sols profonds limono-sableux (figure 4) servent à lancer l'arrosage (figure 8). Les suctions sont captées aux profondeurs de 25, 50, 100, 150 et 200 cm, sur une verticale distante de 25-30 cm d'un rang de canne normalement développée. Dans la phase de croissance de la canne, l'arrosage est déclenché quand le tensiomètre situé à 25 cm (deux premiers mois de repousse) puis celui situé

à 50 cm dépassent 500 hPa en succion (correspondant à -500 hPa en termes de potentiel matriciel noté h). En phase de maturation, il est tenu compte de la succion en profondeur en vue d'utiliser une éventuelle remontée capillaire. La valeur de déclenchement a été choisie aussi élevée pour limiter les percolations et faire en sorte que la canne intervienne de façon très active dans la dynamique de l'eau.

Les installations tensiométriques pour le suivi des mouvements souterrains de l'eau

Les mouvements souterrains de l'eau sont suivis grâce à deux jeux de trois batteries tensiométriques (photo 2) situés de part et d'autre d'un rang de canne (figure 9), dans la zone de sols limono-sableux (figure 4). Un logiciel transforme les données de potentiel total (H), somme des potentiels matriciel (h) et gravitaire ($-z$), en courbes d'isopotential hydrique. Il utilise la méthode géostatistique du krigeage qui fournit une représentation cartographique de la variable étudiée à partir de ses observations dispersées sur le terrain. Les figures obtenues donnent la direction (perpendiculaire aux courbes d'isopotential) et le sens (vers les potentiels les plus négatifs) des mouvements de l'eau.

La culture de la canne se fait en creux (figure 9), pour permettre une bonne interception de l'eau d'infiltration par le réseau racinaire [15].

Résultats et discussions

Les courbes d'isopotential hydrique

L'examen des données obtenues au cours d'une année culturale montre la succession de trois régimes hydrodynamiques (figure 10). Du début de repousse (28/07/1988) à l'approche de la saison des pluies (07/11/1988), l'eau d'irrigation reste dans le quart ou la moitié supérieurs du sol et les percolations profondes sont quasi inexistantes. Les flux importants de surface (un apport d'eau tous les quatre à cinq jours) sont récupérés par les racines. En saison des pluies

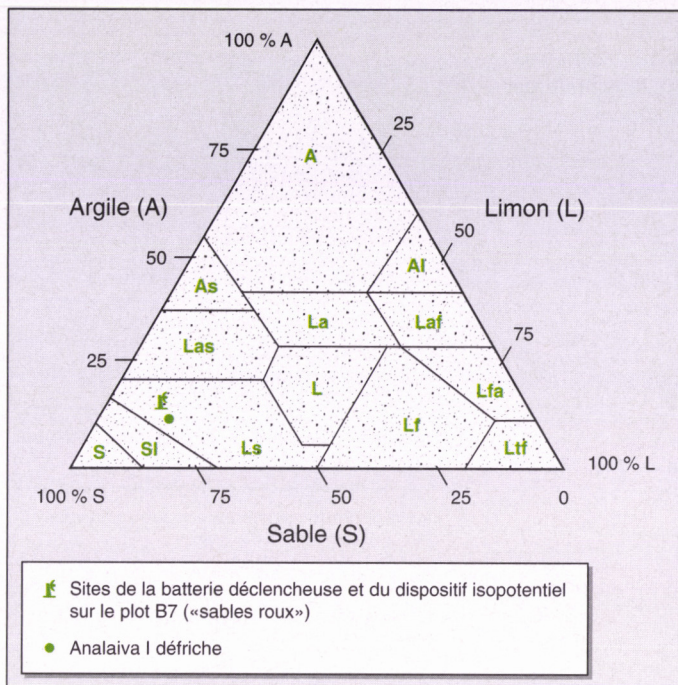


Figure 5. Positionnement des points de référence sur le triangle des textures.

As, Al : sols argilo-sableux, argilo-limoneux ; La, Ls : sols limono-argileux, limono-sableux ; Si : sol sablo-limoneux ; Las, Lf, Laf, Lfa, Ltf : limons argilo-sableux, fins, argileux fins, fins argileux, très fins.

Figure 5. Reference points in the international soil texture chart.

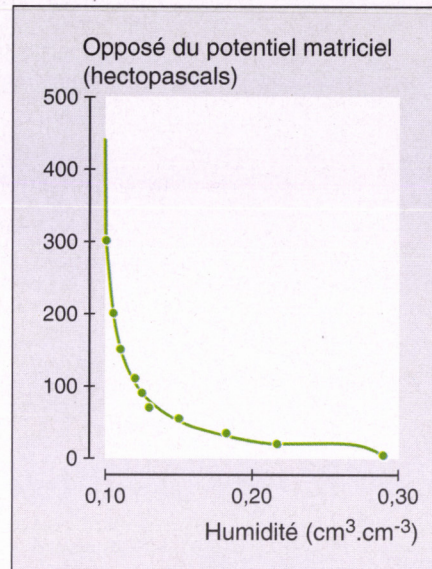


Figure 7. Relation entre succion du sol et humidité.

Figure 7. Effect of moisture on soil suction.

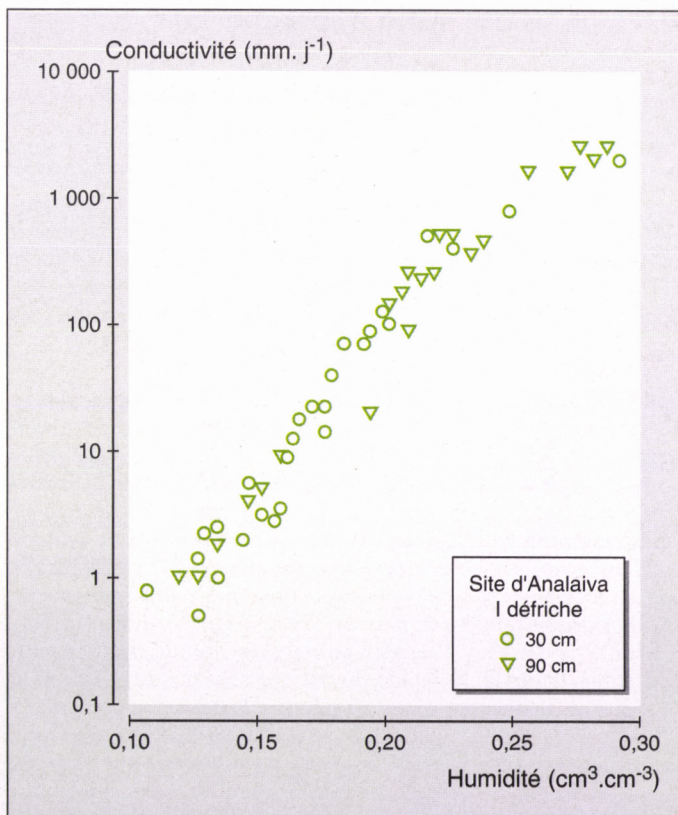


Figure 6. Conductivité hydraulique en fonction de l'humidité.

Figure 6. Effect of moisture on hydraulic conductivity.

(11/02/1989), la situation hydrodynamique est celle d'une infiltration à flux constant, comme le montrent l'horizontalité et l'espacement des courbes d'isopotential (50 cm pour une différence de 50 hPa). Après la saison des pluies

(04/04/1989), la circulation combine un mouvement descendant de surface et un mouvement ascendant profond. Les flux de surface prennent alors naissance de préférence à la base des tiges de canne (figure 11). Ceci résulte de la culture en

creux et de l'effet entonnoir de la végétation. Les flux profonds résultent de la présence d'une nappe vers 4 à 6 mètres de profondeur et d'un enracinement profond de la canne à ce stade [17, 18]. La ligne de séparation des flux descendant et ascendant remonte progressivement après les pluies, mais est susceptible de descendre si une pluie très tardive s'ajoute à une irrigation (au total 38 mm entre le 11/05/1989 et le 17/05/1989). Dans ce cas, l'assèchement recherché du profil est un peu décalé, mais suffisant toutefois pour permettre une bonne maturation de la canne [16, 17].

L'estimation des flux

Selon la direction verticale, le flux d'eau q_z à la profondeur z est donné par la loi de Darcy généralisée :

$$q_z = -K(h) \frac{dH}{dz}$$

avec h et H désignant respectivement les potentiels matriciel et total (en hPa) à la cote z (en cm) ; la fonction $K(h)$ est la conductivité hydraulique mise en relation avec le potentiel matriciel par l'intermédiaire de l'humidité volumique. Le signe négatif résulte de l'orientation de l'axe vertical vers le bas. Dans cette formule, il est possible d'approcher le gradient de potentiel dH/dz par $\Delta H/\Delta z$, ce qui est d'autant plus justifié que le gradient varie peu d'un point à un autre.

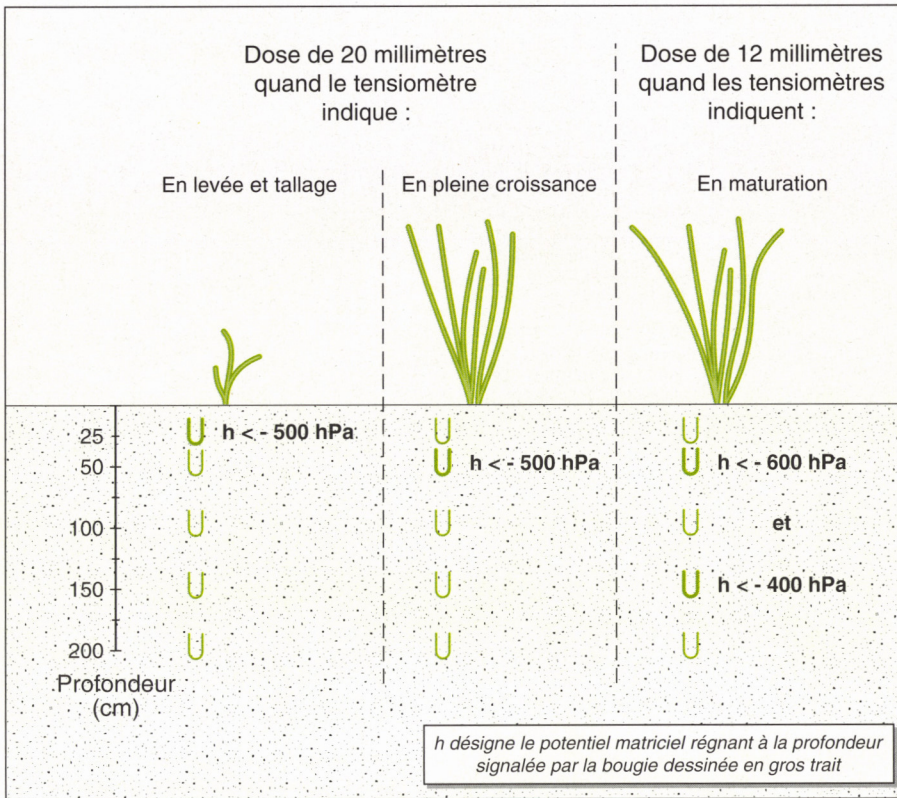


Figure 8. Consignes de pilotage tensiométrique de l'irrigation sur la parcelle B7.

Figure 8. Instructions for tensiometric management of irrigation in the B7 sector.

Ainsi ce gradient vaut -1 le 11/02/1989 (figure 10) et, dans ce cas assez représentatif de la saison des pluies, le flux est numériquement égal à la conductivité. L'estimation de celle-ci comprend trois étapes. La première consiste à calculer le potentiel matriciel à partir du potentiel total (ce potentiel matriciel vaut -85 hPa puisque $H = h - z = -200$ hPa à $z = 115$ cm). La deuxième étape consiste à déduire la valeur d'humidité qui correspond à ce potentiel matriciel : l'emploi de la courbe caractéristique (figure 7) donne entre $0,125$ et $0,130$ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. La troisième étape est la lecture de la conductivité (figure 6) pour cette valeur d'humidité : cela donne autour de $1,5$ $\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$. S'agissant d'une observation de saison des pluies, ce flux vers le bas peut sembler faible, mais il ne faut pas oublier que le sol est très filtrant et qu'il ressuie donc rapidement. Le relevé du 11/02/1989 représente le drainage après une pluie.

Une autre situation intéressante où prévalent des flux verticaux est celle du 05/06/1989. Le flux est cette fois ascendant, car le gradient de potentiel est positif : en profondeur, sur le milieu de la courbe -600 hPa, il vaut à peu près $5,7$ puisque les courbes -700 hPa et

-500 hPa sont distantes de 35 cm. La conductivité associée au potentiel matriciel observé en ce point approchant $0,5$ $\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$, le flux ascendant profond atteint donc presque 3 $\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$. Les flux obliques observés le 04/04/1989 ou à d'autres dates comprennent une composante horizontale et une composante verticale. La dernière se calcule comme précédemment : pour la première, la loi de Darcy s'applique, mais à condition de considérer les composantes horizontales de la conductivité et du gradient de potentiel. Pour le gradient de potentiel, la composante horizontale comme la verticale se déduisent facilement des courbes d'isopotential. Pour la conductivité, il y a une grosse difficulté, car la caractérisation hydrodynamique du site n'a concerné que la composante verticale. Il faudrait donc considérer que la conductivité est la même dans toutes les directions pour pouvoir estimer les flux obliques, ce qui est plausible si l'on s'intéresse aux ordres de grandeur. Dans ce cas, il est plus simple toutefois d'évaluer directement le flux selon une direction perpendiculaire aux courbes d'isopotential, ce qui permet d'éviter la

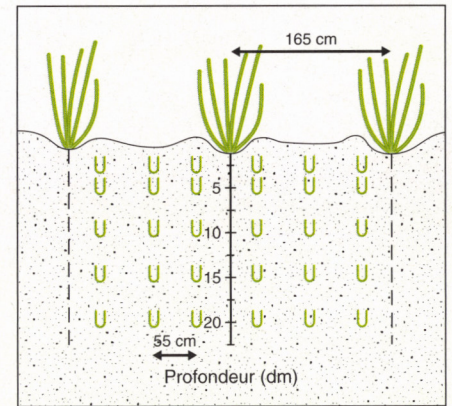


Figure 9. Dispositif à 30 tensiomètres pour suivre l'eau sous canne.

Figure 9. Thirty tensiometers set up to monitor water movement in the soil.

décomposition du gradient de potentiel. En fait, cette supposition donne toute sa valeur aux courbes d'isopotential.

Une approche du fonctionnement du système sol-plante (canne à sucre)

Les courbes d'isopotential permettent de suivre l'eau sur le moyen terme. Les données de la batterie déclencheuse reflètent pour leur part la situation sur le court terme, notamment quant au respect des instructions de pilotage. Nous avons choisi pour l'analyse une partie du relevé antérieure à la saison des pluies (figure 12). L'indisponibilité temporaire de la rampe d'arrosage (pour cause d'entretien) a entraîné certains retards à l'arrosage, mais la courbe d'évolution du potentiel matriciel à 25 cm – à comparer au relevé théorique (figure 1) – est cependant typique d'une irrigation pilotée par tensiomètres [2, 19]. Notamment, la succion augmente de plus en plus vite avec le temps, aussitôt passés l'arrosage et l'humidification très rapide du sol qui s'ensuit [20]. Une mise en correspondance de la montée de la succion avec la courbe caractéristique permet d'approcher l'évolution de l'humidité du sol à la profondeur de la mesure tensiométrique (figure 13). Dans la limite du tracé de la courbe caractéristique, il apparaît que l'humidité diminue de la même quantité chaque jour. Si l'on admet que la mesure tensiométrique est représentative de l'alimentation hydrique de la canne, la consommation d'eau est la même chaque jour. En termes d'eau du sol, cela signifie

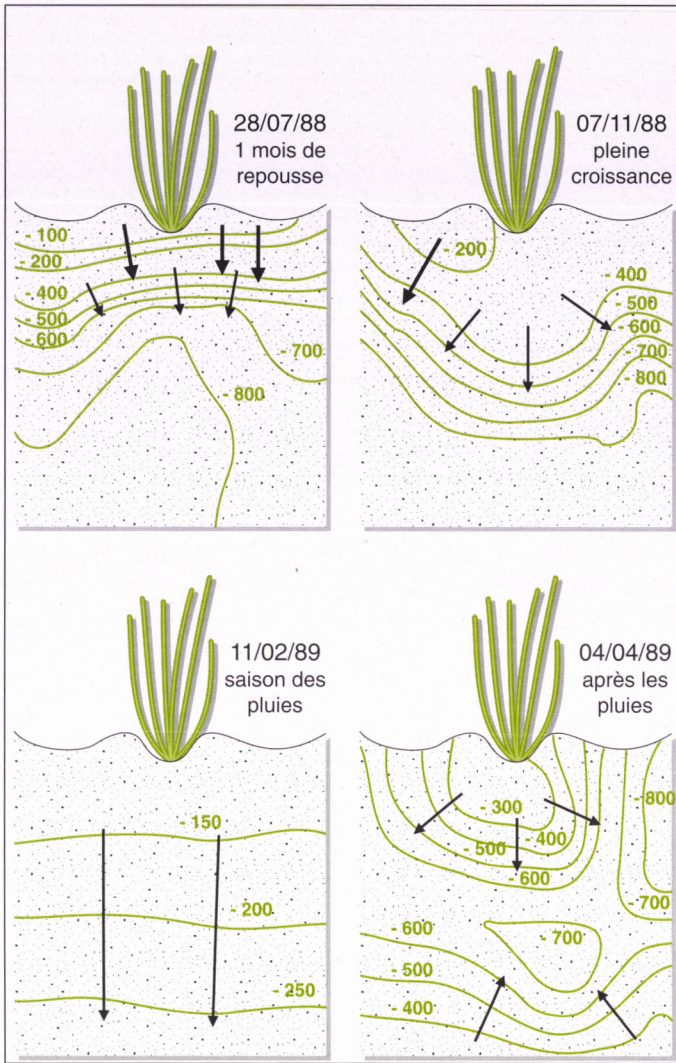


Figure 10. Les mouvements d'eau sous canne dans un carré d'observation de 4 m² centré sur le rang de cannes. Les isopotentiels sont en hectopascals.

Figure 10. Water movement under sugarcane crop in a 4 m² area. Water potentials are given in hectoPascals.

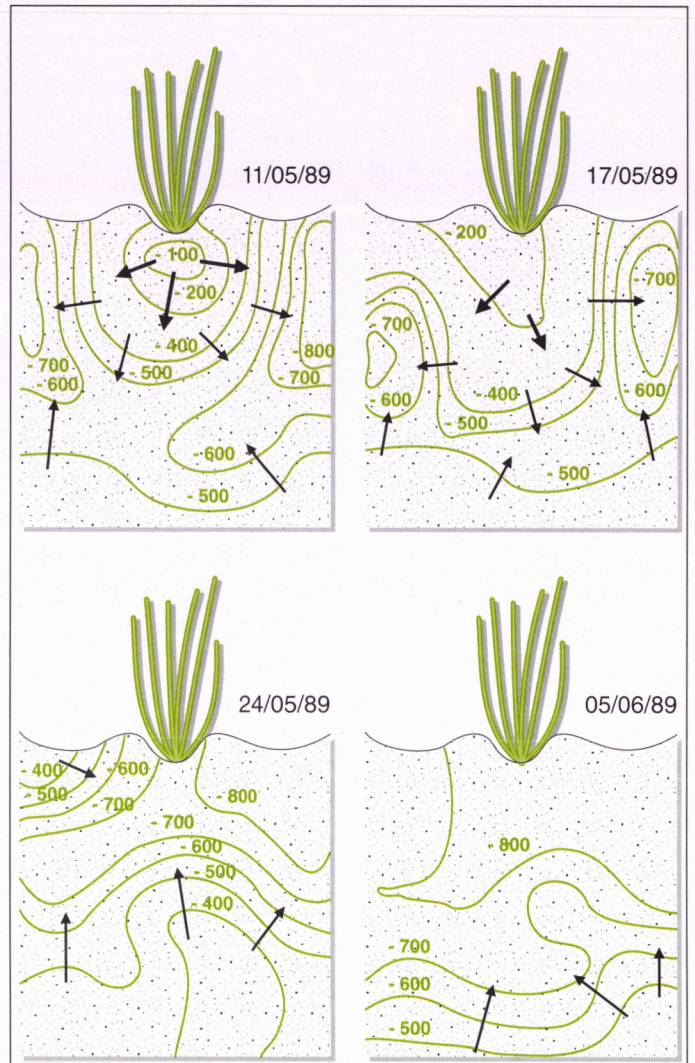


Figure 11. Remontées capillaires en phase de maturation de la canne à sucre. Les isopotentiels sont en hectopascals. Carré d'observation de 4 m².

Figure 11. Capillary rises during sugarcane maturation. Water potentials are given in hectoPascals. Observations were obtained in a 4 m² area.

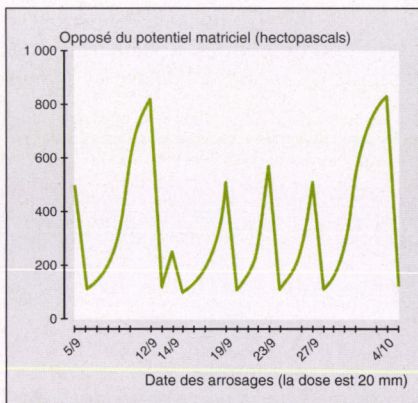
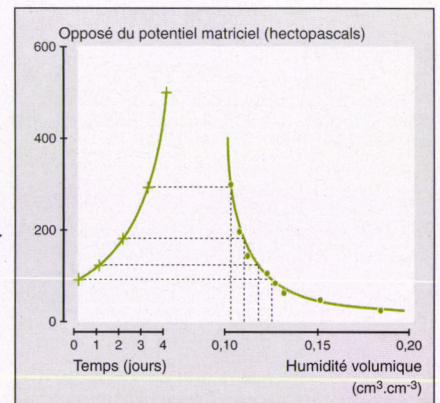


Figure 12. Relevé du potentiel matriciel à 25 cm de profondeur (batterie déclencheuse).

Figure 12. Time-course of suction at 25 cm deep.

Figure 13. Mise en relation de la montée de la succion (période du 15 au 19 septembre 1988) avec la courbe caractéristique de l'humidité du sol.

Figure 13. Correlation between suction rise (September 15 to 19, 1988) and the characteristic soil-moisture curve.



que la plante prélève dans la réserve facilement utilisable et que l'eau n'est pas un facteur limitant du rendement.

Ceci est remarquable, car la réserve utilisable dépend normalement de l'enracinement de la plante. Ici, le facteur enracinement n'apparaît pas directement, car l'arrosage est fait pour que l'eau soit absente en profondeur avant la saison des pluies. Dès la fin de la saison des pluies, il apparaît clairement que la vision en deux dimensions offerte par les courbes d'isopotential est plus pertinente pour comprendre la vie hydrique de la canne. Le code de pilotage accompagne ce changement, en prenant en compte les informations tensiométriques de profondeur.

Conclusion

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre le service irrigation de l'exploitation agricole d'Analaïva et le laboratoire de radioagronomie de Tananarive. Les données scientifiques sur les qualités hydrodynamiques des sols [12], acquises antérieurement, ont permis de mettre en valeur les résultats tensiométriques. C'est la conjonction de facteurs que l'on peut souhaiter pour une expérience pilote en irrigation [21]. Le développement du système d'arrosage par rampes pivotantes, notamment sur les sols ferrugineux africains, peut justifier l'extension de cette approche ■

Remerciements

Nous tenons à remercier M. Pierre Moutonnet, chercheur au sein du département de biologie du CEA (Centre de Cadarache, France), détaché auprès de l'AIEA à Vienne (Autriche) pour ses conseils précieux.

Références

1. Richards LA. Advances in soil physics. 7th Inter. Congress of Soil Science (Madison, Wisconsin, USA) 1960 ; vol. A : 67-79.

2. Richards SJ, Marsh AW. Irrigation based on soil suction measurements. *Soil Sci Soc Am Proc* 1961 ; 25 : 65-70.

3. Korneff BJ. La capacité d'absorption du sol. Appareils pour la mesurer. Arrosage automatique. *Ann Sci Agron* 1926 ; 43 : 353-85.

4. Bordas J, Mathieu G. Recherches sur la force de succion des sols et l'irrigation souterraine. *Ann Sci Agron* 1930 ; 192-207.

5. Richards LA. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science* 1949 ; 68 : 95-112.

6. Jourdan O. *Tensiométrie*. Antananarivo : Laboratoire de Radio-Isotopes, 1980 ; 47 p.

7. Campbell GS. Soil water potential measurement : an overview. *Irrig Sci* 1988 ; 9 : 265-73.

8. Daudet F, Valancogne C. Mesure des flux profonds de drainage ou de remontées capillaires. Leur importance dans le bilan hydrique. *Ann Agron* 1976 ; 27 : 165-82.

9. Katerji N, Daudet F, Valancogne C. Contribution des réserves profondes du sol au bilan hydrique des cultures. Détermination et importance. *Agronomie* 1984 ; 4 : 779-87.

10. Ibrahima A, Mermoud A, Vachaud G. Techniques culturales et alimentation hydrique en zone soudano-sahélienne. *Cahiers Agricultures* 1995 ; 4 : 29-38.

11. Vauclín M, Vachaud G. Bilan d'eau sur sol nu et cultivé. Fiabilité des résultats. *Bulletin du GFHN* 1978 ; 2 : 29-41.

12. Marini P, Villemin P, Jourdan O. *Définition des propriétés hydrodynamiques des sols du périmètre sucrier d'Analaïva*. Antananarivo : Laboratoire de Radio-Isotopes, 1976 ; 41 p.

13. Jourdan O. *Contribution à l'étude de la capacité de rétention en eau des sols. Cas de deux sols malgaches*. Thèse à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 1983 ; 136 p.

14. Gaudin R, Rapanoelina M. *Rapport d'avancement des études tensiométriques pour l'irrigation à la Siranala*. Antananarivo et Morondava : Laboratoire de Radio-Isotopes et Siramamin'Analaïva, 1989 ; 35 p.

15. Fauconnier R. *La canne à sucre*. Paris : Maisonneuve et Larose, 1991 ; 165 p.

16. Gaudin R, Rapanoelina M, Oriol P. *Rapport scientifique des études tensiométriques pour l'irrigation à la Siranala*. Antananarivo et Morondava : Laboratoire de Radio-Isotopes et Siramamin'Analaïva, 1990 ; 42 p.

17. Oriol P, Rapanoelina M, Gaudin R. Le pilotage de l'irrigation de la canne à sucre par tensiomètres. *Agriculture et développement* 1995 ; 6 : 39-48.

18. Baran R, Bassereau D, Gillet N. Measurement of available water and root development on an irrigated sugar cane crop in Ivory Coast. *Proc Int Soc Sugar Cane Technology* 1974 ; 15 : 726-35.

19. Moutonnet P, Brandy-Cherrier M. Possibilités d'utilisation des tensiomètres pour l'automatisation des cultures. *Plant and Soil* 1981 ; 59 : 335-45.

20. Peyremorte P. Pilotage des irrigations : adéquation des estimations ou des mesures ? *Bull du GFHN* 1984 ; 16 : 17-36.

21. Doorenbos J, Pruitt WO. Les besoins en eau des cultures. *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage* 1976 ; 24 : 1-198.

Résumé

L'emploi des tensiomètres à mercure est examiné sous différentes facettes : le progrès du matériel, ses limites et son intérêt pour le contrôle de l'irrigation particulièrement dans les sols légers. Une étude menée à Madagascar sur une plantation de canne à sucre illustre les multiples possibilités de la technique. La mise en route de la rampe pivotante qui assure l'arrosage est asservie à des instructions combinant à la fois le relevé du potentiel matriciel de l'eau du sol (batterie déclencheuse) et le stade de développement de la plante. L'implantation de 30 tensiomètres à 5 profondeurs de part et d'autre d'un rang de canne permet une vision en deux dimensions des mouvements d'eau sous culture. Les implications du code de pilotage sur la vie hydrique de la plante sont discutées. Les données tensiométriques profondes sont à prendre en compte pour une bonne maturation de la canne. Enfin, la descente du potentiel qui accompagne le prélèvement d'eau par la plante, mise en relation avec la courbe caractéristique de l'humidité du sol, montre que l'eau est facilement utilisable sous le seuil de succion choisi pour le démarrage de l'arrosage (500 hectopascals) dans les phases de levée ou repousse, tallage et pleine croissance de la canne.