

## Quelques voies actuelles de la dynamique de l'eau dans le sol en zone intertropicale.

R. POSS\*

### SEVERAL CURRENT TOPICS IN THE DYNAMIC OF WATER IN TROPICAL SOILS.

R. POSS.

*Fruits*, Sep.-Oct. 1990, vol. 45, n° 5, p. 507-510.

**ABSTRACT** - The development of agriculture in the tropics requires improved evaluation of crop water balances. Infiltration is a crucial factor, especially in dry zones. It is frequently controlled by surface reorganisation, especially in the Sahel zone. The evaluation of the amount of water which can be used by plants requires description of root development and on-site evaluation of the field capacity of the different horizons. A neutron humidimeter is required for the monitoring of real evapotranspiration during the crop cycle. These are difficult to use and require carefully defined experimental procedures. Drainage evaluation is often inaccurate, whether calculated using lysimeter measurements or by applying Darcy's law. Spatial variability must be taken into account in the balances, which requires replicates. Remote sensing appears to be a promising topic for studying this aspect. Modeling is used increasingly for the extrapolation of results in space and time and enables the guiding of future research.

### QUELQUES VOIES ACTUELLES DE LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LE SOL EN ZONE INTERTROPICALE.

R. POSS

*Fruits*, Sep.-Oct. 1990, vol. 45, n° 5, p. 507-510.

**RESUME** - Le développement de l'agriculture dans les zones inter-tropicales passe par une meilleure évaluation du bilan hydrique des cultures. L'infiltration est un facteur crucial, surtout dans les zones sèches. Elle est souvent contrôlée par des réorganisations superficielles, particulièrement développées dans les zones sahéliennes. L'évaluation de la quantité d'eau utilisable par les plantes nécessite une caractérisation du développement racinaire et une évaluation sur le terrain de la capacité au champ des différents horizons. Pour suivre l'évapotranspiration réelle au cours du cycle cultural, il faut utiliser un humidimètre à neutrons. Sa mise en oeuvre est délicate, et son utilisation requiert des protocoles expérimentaux soigneusement définis. L'évaluation du drainage est souvent imprécise, qu'elle résulte de mesures en lysimètres ou de l'application de la loi de Darcy. Il est indispensable de prendre en compte la variabilité spatiale dans les bilans, ce qui impose des répétitions. La télédétection semble une voie prometteuse pour étudier cet aspect. L'extrapolation spatiale et temporelle des résultats s'effectue de plus en plus à l'aide de la modélisation, qui permet en retour d'orienter les recherches futures.

*De nombreuses espèces fruitières cultivées en zones intertropicales ou méditerranéennes ont des besoins importants en eau. Dans la majorité des cas, les agronomes ou les agriculteurs concernés par la gestion des exploitations fruitières sont donc confrontés au problème d'optimisation de l'alimentation hydrique des plantes.*

*Trois approches complémentaires sont possibles : a) climatique (ETP, ETR) ; b) sol (stock disponible, potentiel hydrique, conductivité hydraulique, bilan hydrique) ; c) plante (micrométrie des organes, mesure des flux de sève, radiothermométrie, potentiel foliaire).*

*C'est dans ce contexte qu'il m'a paru intéressant de publier dans FRUITS, la synthèse de R. POSS, pédologue à l'ORSTOM, sur les «voies d'études de la dynamique de l'eau dans le sol en zone intertropicale». Cette communication qui fait bien le point des problèmes posés par l'évaluation de l'état hydrique du sol, a été présentée au CIRAD/Montpellier, dans le cadre de l'atelier «dynamique des cations».*

J. GODEFROY

Chef du Service d'Agropédologie IRFA

## INTRODUCTION

Dans toute la zone intertropicale, le développement de l'agriculture se heurte au problème de la pauvreté chimique des sols et à celui de la présence de phases de sécheresse plus ou moins longues au cours de la saison de culture. Il est donc nécessaire d'apporter des fertilisants organiques ou minéraux de telle sorte qu'ils ne soient pas entraînés par lixiviation, et d'adapter les productions végétales et les dates de semis afin d'utiliser au mieux l'eau des pluies.

Les études d'hydrodynamique et d'entraînement des éléments minéraux sont intimement liées. Au niveau du fonctionnement de la plante, l'assimilation des fertilisants dépend des disponibilités en eau. Au Togo méridional, par exemple, tout stress hydrique s'accompagne du développement de signes de carence en potassium. Au niveau des expérimentations, d'autre part, l'étude du drainage nécessite généralement une évaluation du bilan hydrique.

Nous allons aborder ici les différents volets qui composent l'étude du cycle de l'eau au champ, en suivant son cheminement : l'entrée de l'eau dans le sol, son stockage, son utilisation par les racines, et les pertes par drainage. L'extension spatiale et temporelle des résultats nous entraînera ensuite à aborder le problème de la variabilité spatiale, ainsi que celui de la modélisation des résultats.

## L'ENTREE DE L'EAU DANS LE SOL

La quantité d'eau qui ruisselle à l'échelle annuelle sur les grands bassins versants est généralement assez faible (5 à 10 p. 100), mais elle peut être extrêmement élevée au niveau de la parcelle pour les fortes intensités. Pour évaluer ce ruissellement, on utilise généralement des modèles mathématiques, dont le plus simple est constitué d'un seuil pluviométrique au-delà duquel le ruissellement apparaît, et d'un coefficient de ruissellement.

Ces modèles donnent rarement entière satisfaction. Le ruissellement est en effet gouverné par de multiples facteurs, dont l'humidité du sol avant l'averse, le taux de couverture par les plantes et la présence d'organisations pelliculaires superficielles. Si les deux premiers facteurs sont généralement pris en compte, le rôle du troisième commence juste à être perçu. Les organisations de surface diminuent considérablement l'infiltrabilité du sol : de plus de 75 mm/h à moins de 20 mm/h sur les terres de Barre du Togo sur sol humide. Leur développement, et donc leur impact, augmente lorsque le total pluviométrique diminue. Les zones les moins arrosées sont donc également celles où le ruissellement est maximum. Ne pas prendre en compte le ruissellement dans les zones sahéliennes conduirait à surévaluer considérablement l'humectation des sols.

Une des voies de recherche à développer, surtout dans les zones sèches, est donc la compréhension des processus qui gouvernent l'entrée de l'eau dans le sol. Ces études doivent prendre en compte les dynamiques saisonnières, étant donnée l'évolution rapide au cours du temps du taux de couverture par les plantes et des organisations de surface. Il serait souhaitable de parvenir à des modèles d'évaluation du ruissellement qui reposent sur des facteurs présentant une signification physique.

## L'EAU EXTRACTIBLE PAR LES PLANTES

Pour évaluer l'eau extractible par les plantes, il est nécessaire de distinguer le problème de l'eau disponible dans le sol de celui de la présence et de l'activité des racines qui la prélèvent.

La caractérisation de l'activité racinaire est un problème encore mal résolu. Il est possible de connaître assez facilement la profondeur d'enracinement à chaque stade physiologique, en ouvrant des fosses d'observation tous les quinze jours, et même d'avoir une idée de la densité des racines, soit visuellement, soit par pesée après séparation. L'interprétation est toujours délicate, car la présence de racines n'implique pas qu'elles soient physiologiquement actives. Lorsque l'expérimentation comporte des tensiomètres, les succions matricielles permettent d'apprécier leur activité à un instant donné, mais pas de prévoir ce qu'elle devient dans des conditions hydriques différentes. Or les racines profondes extraient incomplètement l'eau du sol, mais aident la plante à survivre pendant les phases de sécheresse, en fournissant de petites quantités d'eau pendant des temps relativement longs.

Pratiquement, on peut estimer que l'eau contenue dans la tranche de sol où sont situées 80 p. 100 des racines est utilisée à peu près entièrement par la plante si l'enracinement est homogène dans le sol. Mais il s'agit là d'une estimation par défaut, une certaine quantité d'eau pouvant être absorbée à des niveaux plus profonds.

Classiquement, la réserve hydrique du sol est évaluée par différence entre l'humidité à un pF de l'ordre de 0,8 et celle à pF 4,2. Si le pF 4,2 ne semble pas poser de problèmes méthodologiques de détermination et bien correspondre à la limite d'absorption de la plupart des végétaux, les humidités aux faibles pF ne sont souvent que des mesures de référence sans signification réelle. D'une part la tension matricielle à laquelle le drainage devient très faible (notion de «capacité au champ») varie d'un sol à l'autre, d'autre part le tamisage de la terre, effectué avant la mesure, crée une porosité qui n'existe pas dans les sols en place, et donc augmente la réserve utile.

Malgré toutes les difficultés théoriques que comporte la notion de capacité au champ, il est cependant nécessaire de disposer d'une valeur fiable de la quantité d'eau que le sol peut retenir. Cette donnée ne peut être obtenue que sur le terrain. La meilleure méthode est le suivi, à l'humidimètre à neutrons, d'un ressuyage sous un sol bâché. Une première approche peut être fournie par des prélèvements à la tarière quelques jours après une pluie suffisante pour humecter tout le sol.

L'évaluation de la réserve utile racinaire est donc délicate. Le plus grand soin doit être apporté à sa détermination, car les plantes, comme les modèles de simulation, montrent une grande sensibilité à ce facteur.

## EVOLUTION DU STOCK D'EAU DU SOL

En l'absence d'humidimètre à neutrons, le suivi de l'évolution du stock d'eau du sol doit s'effectuer à la tarière, en prélevant des échantillons de terre et en les faisant sécher à

l'étuve. Cette méthode simple, économique et non sujette aux pannes, permet d'étudier des variations importantes (maximum et minimum d'humidité par exemple), mais ne permet pas de mettre en évidence les variations de quelques dizaines de millimètres sur un stock total de plusieurs centaines de millimètres, qui sont l'ordre de grandeur de la consommation en eau d'une plante au cours d'une semaine. En effet, deux prélèvements successifs à la tarière ne peuvent pas être réalisés au même endroit, et la variabilité latérale des sols entraîne des différences de stock du même ordre de grandeur que la variation de stock que l'on veut mesurer.

Pour réaliser un suivi plus précis, la seule méthode actuellement opérationnelle est l'humidimétrie neutronique. Son principal avantage réside dans la possibilité d'obtenir rapidement de nombreuses données d'humidité sur un site donné, ce qui ouvre la voie à des suivis de dynamique au cours d'une saison de culture. Cette méthode pose cependant de nombreux problèmes d'utilisation. Elle pose tout d'abord un problème d'installation des tubes de mesure : la mise en place dans les horizons nodulaires, comme dans tous les niveaux riches en éléments grossiers, crée toujours des difficultés, qui sont parfois insurmontables.

Elle pose également un problème d'étalonnage : malgré tous les articles publiés sur le sujet, ce point reste mal résolu. Les meilleurs résultats semblent obtenus à l'aide du suivi d'un ressuyage sous sol bâché après apport d'une lame d'eau ayant humecté tout le sol. Ce suivi doit être réalisé simultanément à l'humidimètre et à la tarière. Cette série de couples, qui correspond à des humidités élevées, doit être complétée par au moins un couple réalisé en fin de saison sèche.

Par ailleurs, le passage des humidités pondérales aux humidités volumiques nécessite la connaissance de la densité apparente du sol à l'emplacement du site de mesure sur toute la profondeur du sol. En l'absence de sonde gammamétrique, le plus grand soin doit être apporté à cette mesure (en effectuant en particulier des répétitions), car elle peut introduire des erreurs de plus de 10 p. 100 sur les stocks.

En zone intertropicale, enfin, le problème de la maintenance des humidimètres reste un problème crucial. Il est impératif de s'équiper d'un appareil qui puisse être réparé dans des délais raisonnables. Etant donné le nombre de pannes qui apparaissent sur ces appareils, un minimum de deux humidimètres semble indispensable pour être assuré de pouvoir obtenir une campagne de mesures complète.

### EVALUATION DU DRAINAGE

Lorsqu'il n'y a pas de nappe dans les sols, le drainage peut être étudié soit à l'aide de lysimètres, soit à l'aide de la loi de Darcy généralisée.

Les lysimètres sont bien adaptés à la connaissance des besoins en eau maximums des plantes : en effectuant un arrosage par semaine, et en recueillant l'eau de drainage, il est aisé de connaître la consommation en eau de la plante. Il faut noter toutefois qu'il est nécessaire de réaliser le lysimètre autour d'un monolithe de sol en place, et non pas à partir de sol remanié, pour obtenir une valeur représenta-

tive du comportement de la plante en milieu naturel.

Les lysimètres conviennent par contre beaucoup moins bien à l'étude du bilan hydrique en conditions naturelles. En effet l'eau ne coule à la base du lysimètre que lorsqu'elle devient saturante, alors que la circulation s'effectue dans le sol à des succions matricielles variables (dans le sol la succion ne peut s'annuler que lors d'épisodes pluvieux importants ou en présence de nappe phréatique). Un lysimètre évalue donc le drainage par défaut. A la base du lysimètre, il se crée par ailleurs une frange capillaire ; pour ne pas perturber les résultats, il est indispensable que le lysimètre soit suffisamment profond afin que les racines ne puissent pas parvenir à ce niveau. Malgré ces imperfections, les lysimètres peuvent cependant constituer un solide «garde-fou» contre les sous-évaluations du drainage.

L'application de la loi de Darcy généralisée permet d'évaluer le drainage à n'importe quelle profondeur, à condition de connaître les coefficients de conductivité hydraulique et le gradient de charge. Les gradients de charge peuvent être connus avec une assez bonne précision grâce aux tensiomètres, appareils maintenant bien au point et d'usage assez aisé. Les coefficients de conductivité hydraulique sont par contre beaucoup plus délicats à déterminer, car ils nécessitent des expérimentations tensio-neutroniques complexes. De plus, les relations obtenues montrent généralement des variations de conductivité de 1 à 10 pour des variations d'humidité de quelques pour cent. Il est donc important de connaître les paramètres hydriques avec une bonne précision pour obtenir une valeur fiable du drainage.

Lorsqu'il existe une nappe dans le sol, l'étude du bilan hydrique au niveau de la parcelle devient délicate, car il est difficile d'estimer la quantité d'eau qui circule latéralement ainsi que l'utilisation que les plantes font de l'eau de la nappe. Des nappes apparaissent pourtant dans un grand nombre de sols de la zone des savanes, et constituent un facteur parfois très favorable, lorsqu'elles sont à faible profondeur, parfois extrêmement limitant lorsqu'elles sont à proximité de la surface du sol. L'étude de l'hydrodynamique des sols engorgés en saison des pluies est une voie de recherche à développer, dans le cadre de la valorisation agricole de l'eau de la zone des savanes.

### LE PROBLEME DE LA VARIABILITE SPATIALE

Bien que l'organisation des sols tropicaux sous forme de toposéquences soit connue depuis plusieurs décennies, la notion de variabilité spatiale est encore mal intégrée dans de nombreuses études actuelles. Nous continuons à considérer nos observations au champ comme indépendantes et distribuées normalement, alors qu'il apparaît de plus en plus clairement qu'elles sont spatialement corrélées. Cet état de fait résulte probablement de deux facteurs indépendants.

L'outil statistique utilisé, la géostatistique, est lourd et délicat à utiliser. En forçant un peu le trait, on pourrait presque dire que l'on fait encore des études de géostatistique sur des données de sol, et non pas des études de données de sol à l'aide de la géostatistique. L'apparition de nouveaux logiciels conviviaux, ainsi que les résultats de études en cours, permettront certainement de dépasser ce stade.

Le deuxième facteur est la difficulté de déterminer quels sont les facteurs qui sont responsables des variations latérales de rendement, et sur lesquels il convient donc d'appliquer l'outil statistique. Il ne fait cependant aucun doute que dans les régions semi-arides les variations latérales de réserve utile racinaire jouent un rôle de premier plan.

Une voie possible pour caractériser l'hétérogénéité spatiale sur des parcelles suffisamment grandes est l'utilisation de la télédétection à certaines phases physiologiques critiques de la plante. Cette méthode permet d'effectuer un zonage, et donc de déterminer les sites sur lesquels les paramètres déterminant le rendement peuvent être recherchés.

### LA MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE

Même en l'absence de variabilité latérale des sols, la variabilité dans le temps des précipitations conduit à modéliser le bilan hydrique, afin de pouvoir transposer à d'autres conditions climatiques les observations réalisées une année donnée.

De nombreux modèles ont été proposés, certains concernant uniquement le bilan hydrique, d'autres intégrant la croissance des plantes. Lorsque ces modèles sont validés, ils permettent de réaliser des études de risque et donc de déboucher sur des stratégies agricoles.

La principale difficulté provient de l'ajustement et de la validation des modèles. Les plus complexes simulent le fonctionnement du continuum eau-sol-plante-atmosphère à l'aide d'une série d'équations qui rendent compte des processus physiques en jeu. Ces modèles nécessitent la connaissance de nombreux paramètres physiques, qui ne peuvent généralement pas être tous mesurés. Le modèle est alors ajusté sur les valeurs de terrain, en faisant varier les paramètres inconnus, qui deviennent ainsi des paramètres

d'ajustement. D'autres modèles, plus simples, cherchent à simuler le fonctionnement hydrique du système sans rendre compte des processus physiques en jeu. Ces modèles sont plus aisés à utiliser que les précédents. Après validation, ils permettent de répondre à certaines interrogations : l'utilisation du modèle BIP-TOGO, dérivé du modèle BIP de l'IRAT, a permis au Sud-Togo de définir les dates optimales de semis à l'échelle régionale, de proposer un zonage agro-pédoclimatique et d'évaluer le drainage profond moyen, donc les pertes en éléments fertilisants.

Il ne fait aucun doute que les modèles de simulation sont appelés à se développer, et qu'il faudra de plus en plus concevoir les expérimentations de terrain de telle sorte que les résultats puissent s'intégrer facilement dans des modèles.

### CONCLUSION

Dans de nombreuses régions de la zone intertropicale, la saison de culture est caractérisée par de grandes variations du stock d'eau contenu dans le sol, que ce soit dans le temps ou dans l'espace. Ces variations sont responsables, pour une grande part, de la variabilité des rendements obtenus, par manque d'eau, par excès d'eau ou par entraînement des éléments nutritifs.

La caractérisation du fonctionnement hydrique du sol en place reste cependant toujours délicate, et elle ne peut pas faire l'objet d'un protocole standardisé : la méthodologie doit s'adapter non seulement aux buts recherchés et aux moyens disponibles, mais également au type de sol étudié.

L'extrapolation spatiale et temporelle des résultats obtenus en parcelles d'essai doit de plus en plus passer par une phase de modélisation, qui intègre les résultats, mais qui peut également orienter en retour les recherches à venir.

---

### ALGUNAS VIAS ACTUALES DE LA DINAMICA DEL AGUA EN EL SUELO EN ZONA INTERTROPICAL.

R. POSS.

*Fruits*, Sep.-Oct. 1990, vol. 45, n°5, p. 507-510.

RESUMEN - El desarrollo de la agricultura en las zonas intertropicales pasa por una mejor evaluación del balance hídrico de los cultivos. La infiltración es un valor crucial, sobre todo en las zonas secas. Con frecuencia es controlada por reorganizaciones superficiales, particularmente desarrolladas en las zonas sahelianas. La evaluación de la cantidad de agua utilizable por las plantas necesita una caracterización del desarrollo de las raíces y una evaluación sobre el terreno de la capacidad en el campo de los diferentes horizontes. Para seguir la evapotranspiración real en el transcurso del ciclo de cultivo, hay que utilizar un humidímetro de neutrones. Su puesta en obra es delicada, y su utilización requiere protocolos experimentales cuidadosamente definidos. La evaluación del drenaje es con frecuencia imprecisa, resultante de medidas en lisímetros o de la aplicación de la ley de Darcy. Es indispensable tomar en cuenta la variabilidad espacial en los balances, lo que impone repeticiones. La teledetección parece una vía prometedora para estudiar este aspecto. La extrapolación espacial y temporal de los resultados se efectúa cada vez más con ayuda de la modelización, que permite, orientar las investigaciones futuras.