

LES ÉTUDES ANALYTIQUES DE L'INFILTRATION, DU MOUVEMENT DE L'EAU DANS LE SOL ET DE L'ALIMENTATION DE LA NAPPE PHRÉATIQUE SUR QUELQUES BASSINS REPRÉSENTATIFS DE L'O.R.S.T.O.M.

Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 13 juin 1969

PAR P. DUBREUIL *

Au cours des trois ou quatre dernières années, les études sur bassins représentatifs à l'ORSTOM ont atteint un certain palier et subi quelques modifications d'orientation. Les nombreuses études de la décennie passée nous avaient apporté d'intéressantes informations sur l'abondance du ruissellement, sur ses caractéristiques et sur le mécanisme de sa formation, grâce à plus de 80 ensembles répartis dans la zone intertropicale. La définition des paramètres de la fonction de transformation pluie-débit, la variation de cette fonction et les aspects divers qu'elle revêt suivant le milieu physique incriminé, étaient et sont encore les points délicats mis en évidence par ces études.

L'analyse précise de la transformation pluie-débit exige que soit examiné quantitativement le devenir de l'eau de pluie qui ne ruisselle pas, et cet examen ne peut prétendre être clair qu'en restreignant la surface du bassin versant, afin que les conditions du milieu physique y présentent la plus grande homogénéité possible.

A ce stade d'évolution de la recherche, nous rejoignons les points de vue exprimés de par le monde, au symposium de Budapest, où l'intérêt des analyses sur bassin élémentaire de quelques hectares apparaissait clairement [1].

Quelques réflexions sur le rôle du sol dans le cycle hydrologique [2] nous permettaient alors de préciser l'aspect théorique sous lequel il serait souhaitable d'aborder l'étude de l'infiltration, du mouvement de l'eau dans le sol et de l'alimentation de la nappe phréatique. Ainsi se dessinaient les nouvelles orientations de recherches de l'ORSTOM sur

bassins représentatifs, qui font l'objet de la première partie de cette note avec l'examen des méthodes de mesure. Dans une deuxième partie, on présente les études actuellement en cours depuis deux ou trois ans sur les bassins élémentaires de Korhogo (Côte d'Ivoire) et de la Tafaina (République Malgache) ainsi que sur plusieurs anciens bassins représentatifs.

De telles études très complexes sont encore trop récentes pour que les conclusions actuelles revêtent un aspect qui ne soit pas provisoire et pour que l'on aille au-delà de la simple présentation des résultats, aussi modestes que ceux-ci puissent paraître. Nous avons néanmoins pensé utile de vous exposer nos travaux sur ce thème, le stade atteint et les objectifs futurs, compte tenu des difficultés rencontrées.

Les objectifs poursuivis et les moyens mis en œuvre

Les considérations théoriques, présentées en introduction, débouchent sur plusieurs programmes de recherches qui tous ont en commun d'être développés sur le terrain en zone tropicale, c'est-à-dire loin des laboratoires et des champs d'expérience qui leur sont contigus et où, la plupart du temps, se déroulent des études de même nature. Le travail sur le terrain, sur des bassins versants qui posent des problèmes scientifiques ou de développement économique, est beaucoup plus difficile et cela justifiera peut-être que nous nous étendions sur objectifs et moyens.

* Directeur de Recherches à l'ORSTOM.

Les objectifs.

Ils se classent en trois groupes, les deux premiers relatifs à des études analytiques sur bassins élémentaires, le troisième plus orienté vers la synthèse d'études sur bassins représentatifs :

a) Définir et préciser les facteurs de la fonction de ruissellement, c'est-à-dire essentiellement pour un milieu physique donné — complexe sol végétation homogène — établir la fonction de transformation pluie-débit en s'appuyant sur telle ou telle caractéristique de la pluie et en explicitant l'état d'humectation préalable des terrains. Le niveau actuel des analyses n'est pas satisfaisant, car, d'une part, le choix de la fraction de précipitation (utile, au-dessus d'un certain seuil, pour une certaine durée...), de l'indice d'humectation (pluie antérieure sur n jours, temps antérieur...) reste mal défini, et, d'autre part, la précision des régressions pluie-débit est encore insuffisante.

b) Expliquer quantitativement les mécanismes de l'infiltration dans le sol non saturé et de l'alimentation de la nappe phréatique; c'est-à-dire, pour un complexe sol-végétation homogène, répondre aux questions suivantes : quand commencent le ruissellement et l'infiltration, quelle vitesse l'infiltration a-t-elle, comment l'infiltration varie avec l'intensité de pluie, par rapport à l'état d'humectation préalable, par rapport à la durée de la pluie, etc., toutes ces questions ayant déjà reçu de nombreuses réponses en laboratoire et quelques réponses partielles sur parcelles soumises à pluie simulée, mais aucune à l'échelle d'un bassin d'une certaine surface.

c) Déterminer les caractères hydrodynamiques des sols des bassins représentatifs déjà étudiés, afin de pouvoir non seulement différencier l'action des divers types de sols sur le cycle hydrologique, mais disposer d'éléments de comparaison entre bassins pour ultérieurement tenter l'extension par analogie des données hydrologiques par le biais des paramètres du milieu physique qui comprennent ces caractéristiques hydrodynamiques.

Les moyens.

Les programmes a) et b) se réalisent sur des bassins élémentaires de quelques hectares, dont le complexe sol-végétation est le plus homogène possible. A l'intérieur de ceux-ci, on envisage l'implantation de parcelles expérimentales destinées à la mesure du ruissellement et à celle de l'érosion; l'emploi ultérieur d'un simulateur de pluie est prévu pour 1970 sur le bassin de Korhogo. Dans ce cadre, les moyens classiques de l'hydrométrie et de la pluviométrie sont renforcés des moyens destinés à la connaissance du taux et du gradient d'humidité des sols. Etant donné les buts concrets poursuivis et les conditions de terrain à affronter, l'emploi des moyens complexes et sophistiqués a été proscrit; les mesures d'humidité se font soit par prélèvements et gravimétrie soit par sondages à l'humidimètre à neutrons.

Prélèvements et gravimétrie.

Rien à dire sur cette technique. Cependant sa mise en œuvre en sols tropicaux n'est pas exempte

de difficultés : pénétration des tarières souvent inhibée par les concrétions et cuirasses ou simplement par la sécheresse des sols, choix du contenant léger, solide et imperméable pour le transport des échantillons (double sac plastique, boîte à tare en pyrex à fermeture rodée). La cadence des mesures et la nécessité de peser rapidement les échantillons exigent une organisation efficace du travail de terrain qu'il n'est pas aisé de réaliser en zone tropicale.

Humidimètre à neutrons.

Rien à dire non plus sur cette technique. Cependant elle n'est pas du tout, elle, classique ni très répandue et son introduction sur le terrain en pays tropical, loin de tout laboratoire, a exigé près d'un an de tâtonnements aux meilleures équipes. Pierre Pourrut, sur le bassin de la Tafaina, a été l'un de ces précurseurs; les obstacles rencontrés, longuement évoqués dans une récente publication [3] et peu à peu franchis, sont :

- difficulté de l'étalonnage sur sol tropical *in situ*;
- manque d'étanchéité de l'intégrateur lors du travail sous averse, en saison très humide (isolement par résine spéciale des prises de branchement du câble et de l'enregistreur);
- choix d'une source d'énergie autonome, stable et robuste;
- poids et fragilité de l'équipement pour le transport sur mauvaises pistes.

L'absence d'humidimètre adapté aux mesures en surface reste un inconvénient certain pour l'obtention d'un profil hydrique complet.

Quelques exemples de secteurs d'études et premiers résultats

On passe successivement en revue les études à caractère normalisé et extensif de mesures sur bassins représentatifs, puis les études fines entreprises à la Tafaina et à Korhogo.

Détermination des paramètres du sol influant le cycle hydrologique.

Cette opération, dont les objectifs [2] et les protocoles de mesure [4] ont déjà été publiés, se développe depuis 1967 sur 25 ensembles de bassins représentatifs étudiés par l'ORSTOM dans la zone de la savane arborée sur sols ferrugineux tropicaux.

Chaque bassin fait l'objet d'une cartographie détaillée des sols dressée par un pédologue de l'ORSTOM. Dans chaque unité de sol cartographié, il est fait choix d'au moins un site de mesures. En chaque site, il est effectué :

- des essais triples de perméabilité *in situ* par la méthode Porchet;
- des prélèvements destinés à déterminer *in vitro* potentiel capillaire, teneur en matière organique, porosité, densité apparente, etc.;
- six séries de profils hydriques destinés à couvrir la gamme complète de variations annuelles de la teneur en eau du point de flétrissement à la ca-

pacité de rétention, chaque série comportant trois trous de prélèvements.

Dans ce programme d'études, outre la détermination des paramètres, il y a une *recherche méthodologique destinée à apprécier la précision de la densité des mesures*, recherche concrétisée par les questions suivantes :

- combien de sites doit-on retenir par unité de sol;
- combien de trous sont nécessaires en chaque site;
- la précision des mesures d'humidité dépend-elle du taux d'humidité, de la nature du sol ?

La nature des sols tropicaux et la rigueur des conditions climatiques imposaient cette recherche méthodologique.

A titre d'exemple, nous mentionnerons les résultats obtenus sur le bassin de Nadjoundi au Togo (latitude 11° N) formé de sols ferrugineux tropicaux lessivés, peu évolués et minéraux bruts d'origine non climatique d'érosion sur roche-mère granito-gneissique. Neuf sites de prélèvements ont été retenus sur trois unités de sol; 525 prélèvements ont été effectués en triplant les mesures. On a admis que le taux d'humidité vrai était estimé au mieux en prenant la moyenne des taux mesurés dans les trois trous, aux mêmes profondeurs. Pour avoir des échantillons indépendants de variables aléatoires, on a calculé les écarts relatifs de chaque taux d'humidité à sa moyenne.

La variabilité de ces écarts a été testée :

a) *En fonction du type de sol* par comparaison de variances (test de Snedecor).

L'influence du type de sol est possible, car la plupart des résultats donnent une probabilité inférieure à 5 % pour des échantillons de 40 à 300 valeurs. Cette influence devra être précisée, car elle ne paraît pas liée systématiquement à un type de sol déterminé.

b) *En fonction de la profondeur.*

Pour les 20 premiers centimètres, la dispersion est plus grande que sur tout le profil. L'écart-type passe de 0,183 à 0,159 pour ces deux groupements, ce qui donne des erreurs à craindre de 0,123 et 0,107 sur les mesures. Cela signifie qu'une mesure ponctuelle peut s'écarter relativement de 10 à 12 % de la moyenne vraie (dans l'intervalle interquartile) si elle est prise quelque part dans le profil ou en surface, mais évidemment à même profondeur. *L'intérêt de multiplier les prélèvements n'est donc pas superflu.* Ainsi, dans l'exemple choisi, la précision sur la moyenne du taux d'humidité mesurée à une certaine profondeur passe-t-elle, sur tout le profil, de 6,2 à 7,6 et 10,7 % selon que l'on effectue trois, deux ou un seul trou. Une précision de 10 % sur la valeur de l'humidité est possible avec trois trous en surface, un en profondeur; pour obtenir 5 %, il faudrait six trous en surface, trois en profondeur. Cette étude de précision va permettre d'optimiser les prélèvements.

Cette recherche méthodologique se poursuit sur tous les bassins et sur tous types de sol rencontrés. Parallèlement, la détermination des paramètres de sol est en cours d'élaboration et permettra d'ici deux ou trois ans d'établir un catalogue complet relatif aux bassins de l'ORSTOM en zone inter-tropicale, catalogue qui sera la base d'analyses mul-

tifactorielles à développer avec les caractéristiques hydrologiques pour en expliquer la variabilité par la connaissance du milieu.

Le bassin de la Tafaina.

Des études classiques du ruissellement y sont en cours depuis 1962. Un programme d'étude d'infiltration et de mouvement de l'eau dans le sol y est développé, depuis 1966, par P. Pourrut. Les caractéristiques de ce bassin sont portées dans le tableau donné page suivante.

Dans l'ensemble, les sols sont peu perméables et le ruissellement apparaît pour une averse de 7 mm quel que soit l'état antérieur d'humectation. Durant quatre années hydrologiques, de 1962 à 1966 [5], l'écoulement a prélevé de 43 à 52 % des apports fluviaux, les pertes oscillant entre 48 et 57 %, auxquelles correspond un déficit d'écoulement de 580 à 810 mm. L'écoulement est permanent, l'étiage oscillant de 25 à 60 l/s. Le tarissement admet une représentation exponentielle $Q = Q_0 e^{-0,004t}$. Les réserves souterraines le 1^{er} avril (étiage absolu en octobre) seraient de l'ordre de 1 400 000 m³, soit 300 mm de lame d'eau.

Au stade actuel, les études d'humidité du sol se cantonnent sur deux parcelles de 100 m², sur unités de sol différentes et de pente variable. Chaque parcelle est équipée de plusieurs tubes (polyéthylène et duraluminium) pour descente de la sonde à neutrons (HP, IP, EC 310 de la C.G.E.I.). Du programme de recherche décrit au premier chapitre, nous extrayons quelques exemples de résultats obtenus sur des points précis [3].

Bilan hydrique d'une averse.

L'établissement d'un profil hydrique juste avant et juste après une averse permet de faire la part entre ruissellement, variation du stock d'eau de la zone non saturée, pertes par évapotranspiration. La rapidité de variation du taux d'humidité dans les 20 ou 30 premiers centimètres du sol, la lenteur de cette variation en profondeur, rendent complexe l'interprétation des mesures. Les essais réalisés évaluent à 30 et 50 % environ les pertes d'une averse, ce qui paraît élevé.

Indice d'humectation.

La mesure ponctuelle à 10 cm de profondeur du taux d'humidité présente une corrélation serrée avec le coefficient de ruissellement, dû à l'averse qui suit cette mesure. Cette constatation doit permettre une amélioration de la fonction de transformation pluie-débit.

Infiltration pendant une averse.

Des mesures ponctuelles, à 10 cm de profondeur, réalisées avec une cadence serrée, à partir du début d'une averse, permettent, en suivant l'évolution du taux d'humidité, de préciser les conditions d'infiltration.

La figure 1 montre un tel examen pour une pluie de 22,5 mm suivie d'un ruissellement de 2 mm. D'autres essais ont donné des résultats comparables. P. Pourrut explique ainsi la variation du taux d'humidité observée [3] : « Il y a superposition

Caractéristiques des bassins de Korhogo et de la Tafaina

CARACTÉRISTIQUE	TAFAINA	KORHOGO
Situation géographique.	République Malgache, 35 km sud Tananarive. 19° 9' S. 47° 29' E.	Côte d'Ivoire. Bassin du Bandama. 9° 25' N. 5° 39' W.
Topographie.	4,5 km ² . Relief accusé, sommets à 1 600 m d'altitude. Chutes sur les thalwegs nombreux.	3,63 km ² . Altitude 400 m. Relief moyen. Un seul thalweg naît au milieu du bassin dans un marécage.
Géologie.	Migmatites granitoïdes, granites migmatitiques, quartzites et leptynites. Schistes paragneissiques érodables en lavaka.	Granit calco-alcalin précambrien.
Altération et sol.	Altération sur 30 m. Argile plus ou moins sablo-limoneux.	Altération de 0 à 35 m. Sol ferrugineux tropical.
Nappe.	Sources pérennes à faible débit.	Nappe d'arène à exutoire superficiel plus haut que son fond (marécage).
Végétation.	Prairie à graminées. Rizières des vallées.	Culture (mil, arachide) et jachères.
Climat.	Tropical austral d'altitude.	Tropical de transition nord.
Précipitations.	Novembre à mars. Cyclones 1 350 mm/an (Cv = 0,21).	Avril à octobre. 1 400 mm/an (Cv = 0,22).
Evaporation.	1 600 mm/an sur bac enterré.	2 000 mm/an sur bac enterré.

de deux modes de pénétration de l'eau : d'une part mise en eau des gros conduits (porosité tubulaire ou macroporosité), d'autre part le remplissage des micropores (porosité capillaire ou microporosité); la porosité tubulaire serait responsable de la transmission rapide à des niveaux inférieurs d'une partie de l'eau — En deçà d'un certain seuil, l'apport d'eau étant insuffisant, il y aurait ressuyage de ces gros tubes et baisse de H %. La fin de l'averse, bien que faible, serait suffisante pour alimenter les micropores et faire croître à nouveau H %. Il ne s'agit encore que d'une hypothèse de travail... mais celle-ci corrobore *in situ* ce qu'avait démontré *in vitro* A. Féodoroff [6].

Saturation et ressuyage d'un sol sous conditions idéales.

La mise sous charge constante du terrain contenant un tube de mesure permet, en saison sèche, d'étudier les conditions de réhumectation jusqu'à saturation d'un sol sec, puis ensuite en couvrant le sol d'un voile plastique, de déterminer les conditions du ressuyage dudit sol saturé [7].

La figure 2 montre la première partie de l'expérimentation. Le front d'humectation est descendu à 1,15 m en 4 h 15 mn et l'accroissement du stock d'eau a été de 183 mm dans l'intervalle; la vitesse d'infiltration, décroissante de 80 à 20 mm/h du début à la fin de l'essai, représente le maximum infiltrable et peut s'apparenter à la capacité d'absorption.

La figure 3 montre le ressuyage qui paraît s'effectuer par une décroissance régulière du taux d'humidité sur tout le profil saturé. En 160 h, la perte par ressuyage a atteint 118 mm, soit 65 % du

gain précédent. Le ressuyage présente deux phases, l'une rapide pendant 18 h, l'autre lente ensuite; le point de passage d'une phase à l'autre correspond à la capacité de rétention. On a ainsi une méthode simple de mesure de celle-ci.

Approche de l'évapotranspiration réelle d'un sol.

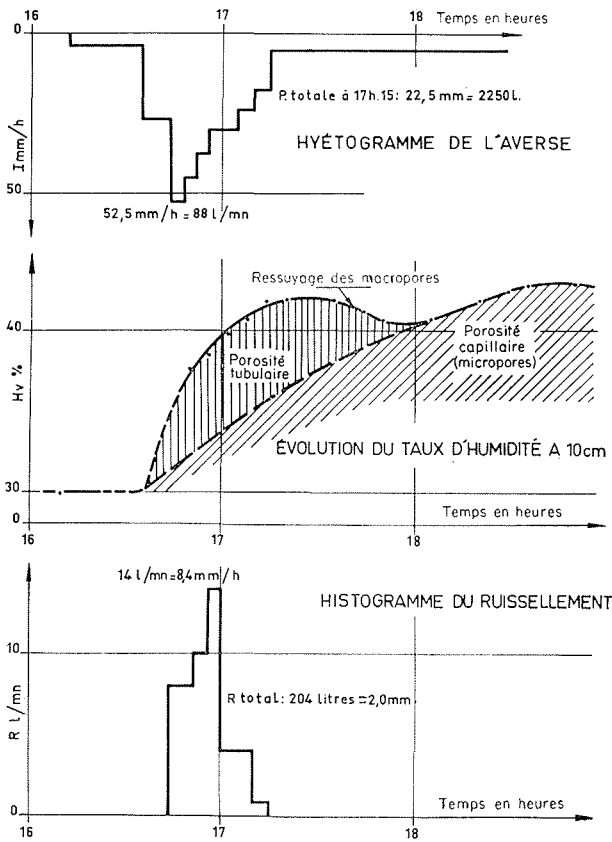
Durant toute la saison sèche, le sol reste à la capacité de rétention à partir de 2,30 m de profondeur. Une série de profils hydriques établie durant cette saison permet donc d'évaluer les seules pertes par évapotranspiration réelle.

La figure 4 montre l'exemple réalisé sur 151 jours du 22 mars au 21 août 1967. En tenant compte des pluies fines qui ont toutes été reprises par évapotranspiration, on peut faire une estimation de la moyenne journalière de ETR qui est présentée ci-dessous en face de l'ETP d'un bac enterré en eau libre, en mm/j.

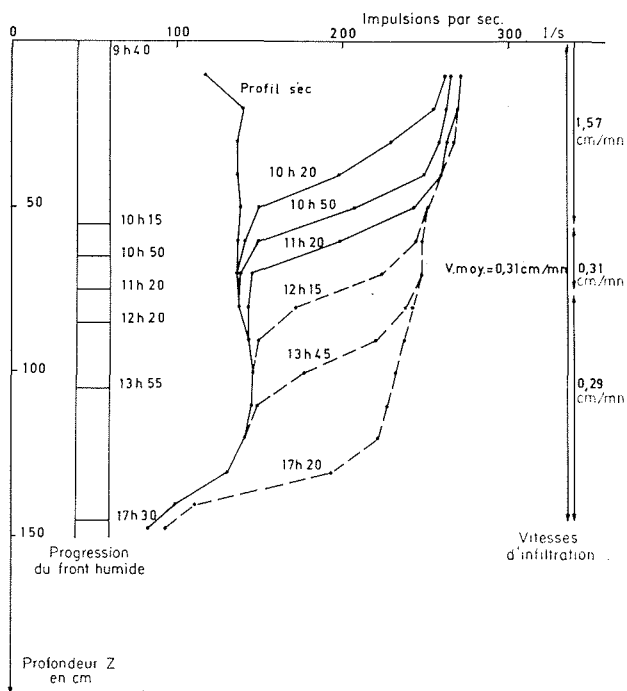
	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOÛT
ETR	3,0	2,0	0,65	0,50	0,25
ETP	4,4	3,6	2,9	3,0	4,2

Le bassin de Korhogo.

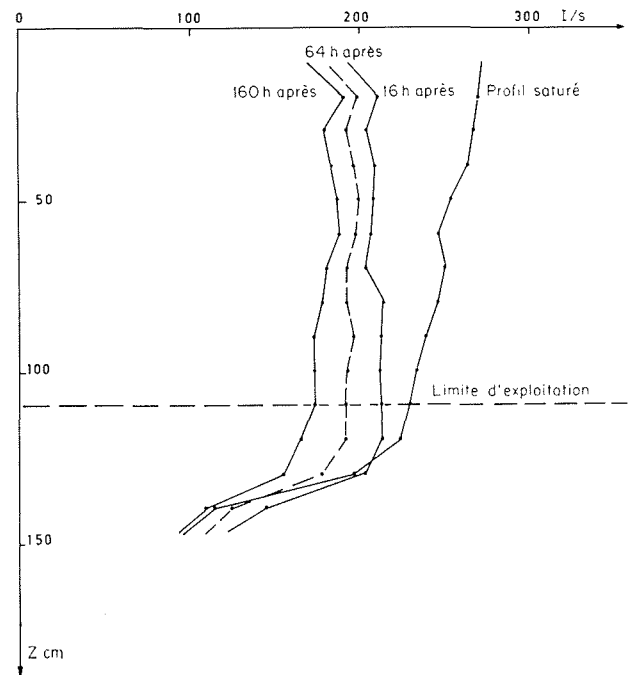
Les caractéristiques de ce bassin sont données à côté de celles de la Tafaina, sur le tableau déjà mentionné. La présence d'une nappe générale d'arènes en partie drainée par le thalweg du bassin offre des conditions assez simples pour essayer une ana-



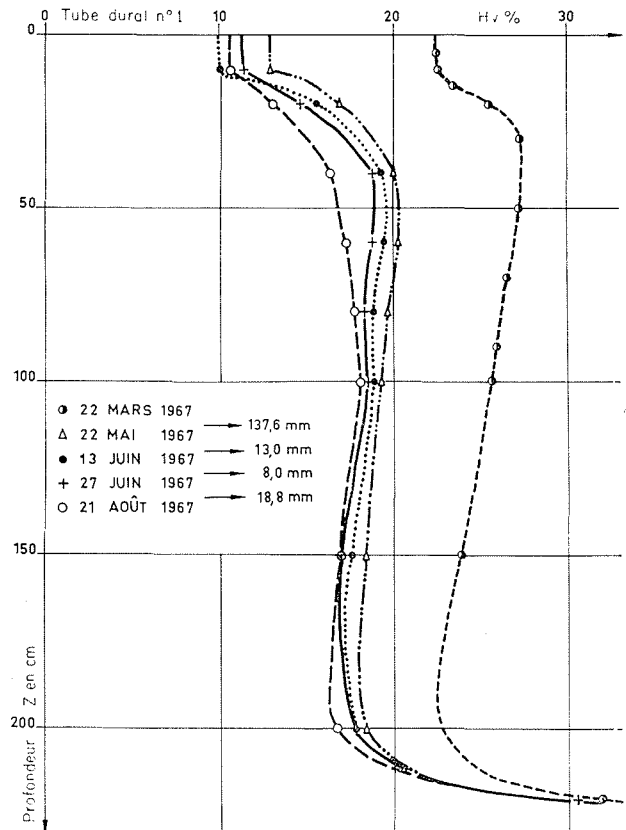
1/ Cinétique de l'infiltration durant une averse provoquant un ruissellement.
Kinetics of infiltration during a storm with runoff.



2/ Cinétique de l'infiltration sous charge constante. Tube sud. Parcelle à faible pente.
Kinetics of constant-head infiltration. South tube. Field with slight slope.



3/ Cinétique du ressuyage. Tube sud. Parcelle à faible pente.
Kinetics of drying. South tube. Field with slight slope.



4/ Cinétique de l'assèchement du sol en saison sèche (sur 150 jours).
Kinetics of soil drying in the dry season (over 150 days).

lyse de l'alimentation de celle-ci. Des études de l'écoulement et du mouvement de la nappe sont en cours depuis 1962. Durant trois années hydrologiques de 1962 à 1965 [8], le ruissellement a pris 5 à 6 % de l'apport pluvial, l'écoulement de drainage de nappe 27 à 38 %; la part du déficit a donc varié entre 56 et 67 % soit de 850 à 1 050 mm (*). Le bassin est très perméable puisque le ruissellement n'apparaît qu'après une pluie de 15 à 20 mm, selon l'état d'humectation.

Le débit de base, représentatif de la nappe, est assez sensible aux précipitations. Il est assez bien lié à un indice d'humectation établi à partir des pluies antérieures avec décroissance exponentielle en fonction du temps (forme $Ih = I_0 e^{-0,197t}$). Le tarissement est également exponentiel et de la forme $Q = Q_0 e^{-0,105t}$.

L'ambition de la nouvelle orientation des recherches en 1966 était beaucoup plus grande qu'à la Tafaïna, puisqu'au lieu de se cantonner dans une première phase à opérer sur des parcelles témoins, on a tout de suite voulu étudier l'ensemble du bassin et de l'alimentation de la nappe. Sur 28 puits équipés pour contrôler le niveau de la nappe dès 1962, on a retenu 12 emplacements destinés aux mesures intensives d'humidité. Faute d'autre moyen, les mesures ont commencé en 1966 par prélèvements à la tarière. L'extrême dureté des sols ne permettait ni d'aller assez profond ni d'aller assez vite pour couvrir tout le bassin en 24 à 48 h. Les résultats obtenus permettent de caractériser hydrodynamiquement les sols, d'étudier la variation du taux d'humidité jusqu'à 2 m, le long de l'année, de faire une estimation de la précision des mesures.

En 1968, une sonde à neutrons ayant été rendue disponible, des tubes ont été mis en place aux 12 sites précédents et les mesures entreprises après l'hivernage en novembre. L'exploration des 12 sites s'effectue en 36 h et se répète avec une cadence de 5 à 6 jours. A côté de cette exploration spatiale, une analyse fine du mécanisme de l'infiltration est réalisée en deux emplacements par l'exécution de profils hydriques horaires dès le début d'une forte pluie jusqu'à la suivante. Bien que la capacité de rétention paraisse se maintenir en saison sèche à partir et au-delà de 1,50 m de profondeur, deux tubes ont été descendus jusqu'à la nappe située à 8 m.

Les points précis d'investigation sont comparables à ceux de la Tafaïna : infiltration pendant une averse et bilan hydrique correspondant, évapotranspiration réelle, alimentation de la nappe. Le stade actuel des résultats est de même nature et ne mérite donc pas d'être présenté en détail. Le volume des données est évidemment près de dix fois plus abondant et le dépouillement laborieux ne permet pas d'espérer l'élaboration d'un modèle d'infiltration sur bassin avant un ou deux ans.

(*) En 1967, année sèche, le déficit a été de 680 mm, soit 51 % de l'apport pluvial.

Conclusions

Les études analytiques de l'infiltration, du mouvement de l'eau dans le sol et de l'alimentation de la nappe phréatique sur les bassins représentatifs de l'ORSTOM ont débuté en 1966. Elles sont en plein développement actuellement sur la Tafaïna et à Korhogo, d'une part, sur vingt-cinq ensembles de bassins représentatifs anciens, d'autre part.

D'ores et déjà, le volume de l'information collectée est considérable.

L'analyse systématique de la précision des mesures et de l'optimisation de la densité des points d'observations est un premier stade qui devra être très rapidement atteint.

La connaissance du mécanisme de l'infiltration lors d'une averse, de l'alimentation de la nappe, de l'évapotranspiration réelle et du bilan hydrique complet d'une averse et d'une saison des pluies représente le second stade sur lequel quelques idées claires se font déjà jour.

La synthèse de ces connaissances et analyses suivra dans un troisième stade selon plusieurs directions : influence du milieu physique (sol) sur les caractéristiques hydrologiques, amélioration du modèle de transformation pluie-débit et construction parallèle d'un modèle d'infiltration.

Obtenir des résultats complets sur ces divers thèmes dans deux ou trois ans paraît satisfaisant si l'on reconnaît la complexité bien supérieure de ces phénomènes par rapport au ruissellement, et les difficultés de travail sur le terrain en zone tropicale.

Références bibliographiques

- [1] DUBREUIL (P.). — Bassins représentatifs et expérimentaux, réflexions sur le Symposium A.I.H.S. de Budapest. *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie n° 4, mai 1966.
- [2] DUBREUIL (P.). — Point de vue théorique sur le rôle du sol dans le cycle hydrologique. *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie, vol. IV, n° 1, 1967.
- [3] POURRUT (P.). — Utilisation pratique de l'humidimètre à neutrons pour les mesures hydrologiques. Premiers résultats obtenus sur le bassin versant de la Tafaïna (République malgache). *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie, vol. V, n° 2, 1968.
- [4] DUBREUIL (P.). — Détermination des paramètres du sol influant sur le cycle hydrologique dans les bassins représentatifs et expérimentaux (protocoles de mesures). *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie, vol. IV, n° 3, 1967.
- [5] ALDEGHERI (M.) et POURRUT (P.). — Etudes hydrologiques sur le bassin versant représentatif de la Tafaïna. Résultats des campagnes 1962-1963 à 1965-1966. *ORSTOM*, Centre de Tananarive, multigraphié, 46 p. + 2 tomes annexes de données, 1968.
- [6] FEODOROFF (A.). — Etude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante. *Annales agronomiques de l'INRA*, vol. XVI, nos 2 et 3, 1965.
- [7] POURRUT (P.). — Approche de certaines caractéristiques hydrodynamiques des sols. Bassin de la Tafaïna. *ORSTOM*, Centre de Tananarive, multigraphié inédit, 8 p., 14 fig., 1968.
- [8] Serv. Hydrol. ORSTOM. — Etude de ruissellement sur le bassin versant de Korhogo (Côte d'Ivoire). Campagne 1962-1965. Etude d'hydrologie de surface, C.I.E.H., multigraphié, 2 tomes, 1966.

Discussion

Président : M. BEAUMONT

Après l'exposé de la communication de M. DUBREUIL, M. le Président remercie les deux auteurs de celle-ci et ouvre la discussion.

M. DUBREUIL pose à M. FEODOROFF la question suivante :

« Vous avez montré dans votre communication de ce matin que dans vos mesures de la « capacité au champ », il y a une rupture très nette entre la phase de ressuyage « rapide » et la phase de ressuyage « lent ». Nos propres expériences — qui diffèrent des vôtres par le fait que nous imposons au terrain une charge hydraulique constante — corroborent ces écarts entre les vitesses de ressuyage au début et à la fin du processus. Dans ces conditions, comment définir la capacité de rétention du terrain dans chacun des deux types d'essai visés ci-dessus ? »

M. FEODOROFF répond :

« L'expérience montre que le profil hydrique en cours d'arrosage varie avec les conditions d'apport de l'eau. La teneur en eau croît avec l'intensité et on obtient vraisemblablement la valeur la plus élevée avec l'infiltromètre de surface (ou appareil de Müntz) que vous utilisez. Après l'arrosage, on observe dans tous les cas, une redistribution avec un stade rapide et un stade lent, le premier étant d'autant plus développé que l'humidité initiale est grande et donc l'intensité élevée. Ce phénomène est illustré par la figure 7 de mon mémoire.

« Quant à l'effet de la « dose » d'arrosage, j'ai voulu en figure 14 montrer qu'il existe, et pour le souligner, je n'ai présenté que le début du phénomène où les courbes sont nettement distinctes. A la longue, elles finissent par se rejoindre de façon analogue à ce qui est représenté en figure 7.

« Pour la détermination de la capacité de rétention il s'agit donc d'estimer, à partir des données expérimentales, la valeur de l'humidité pour laquelle le ressuyage change de rythme. Cette valeur d'humidité ne dépend pas des paramètres de l'apport d'eau (hauteur, intensité) alors que ces paramètres interviennent sur la durée de la phase de ressuyage rapide. C'est une des raisons pour lesquelles les méthodes anciennes de terrain, préconisant de mesurer l'humidité du sol un certain temps, fixé à l'avance (24 h à 48 h), après l'arrosage ne sont pas fidèles, car on se trouve alors, suivant les conditions initiales, sur un point quelconque de la courbe $h = f(t)$. En outre, il n'y a aucune raison pour que des sols différents réagissent de même manière à tel apport d'eau. Au contraire, d'après toutes nos observations, les caractéristiques du sol interviennent, de façon notable, sur la cinétique de la redistribution, en interaction avec les paramètres de la pluie (Cf. équation 7).

« En conclusion, on peut mesurer la capacité de rétention au champ, à partir de n'importe quel type d'arrosage. L'essentiel est d'avoir une densité de mesures suffisante au début de la redistribution et d'interpréter ces mesures d'après la variation de teneur en eau ».

Vous avez, dit M. DUBREUIL, tiré de vos expériences une relation entre la vitesse d'infiltration et la vitesse du front; celle-ci fait intervenir les paramètres μ et V_f qui vous paraissent être les caractéristiques du sol étudié. Ce point intéresse particulièrement l'hydrologue qui cherche à établir une carte « hydrodynamique » des sols d'un bassin versant. Avez-vous pu répéter vos expériences sur plusieurs types de sols — remaniés ou non — et comparer les essais faits sur un échantillon au Laboratoire avec les essais faits sur le terrain ? »

La caractérisation des types de sol par leur comportement hydrologique, répond M. FEODOROFF, a été et est un de nos soucis majeurs. Les résultats de notre travail de laboratoire (tableau 1) ont permis d'établir de quelle façon on pouvait aborder le problème et ceci, à partir d'expériences réalisées sur un nombre limité de matériaux. Vous remarquerez, cependant, que sur les six sols étudiés en laboratoire, il y a deux horizons (l'un, organique, l'autre non) d'un limon loessique représentatif des terres des grandes plaines céréalières du bassin Parisien, deux ho-

rizons d'un sol sableux, ainsi que deux horizons d'un sol ferrallitique non « gonflant » mais argilo-sableux. Sans, bien entendu, couvrir toute la gamme de granulométries et des formations pédologiques, ces sols représentent des terrains assez typiques. Par ailleurs, comme indiqué dans mon rapport, j'ai fait intervenir le paramètre « structure ».

Il nous était difficile, au départ, d'étudier un plus grand nombre de sols car nos moyens étaient fort réduits. De plus, l'ajustement de la relation $V = f(I)$ a dû être fait manuellement, ce qui était long et assez mal commode étant donné la forme exponentielle de l'équation. Mais le choix de cette dernière nous a été imposé par les données expérimentales qui impliquaient des contraintes aux bornes.

La transposition de cette approche à des comportements *in situ*, semble permise au vu des quelques résultats que je vous ai présentés. En effet, nous avons montré deux cas présentant une croissance de V (cette donnée est d'ailleurs meilleure au champ qu'en laboratoire, car elle porte sur la zone de transmission et non pas sur le front en fonction de I . Ces deux points ne nous permettent pas, bien entendu, de vérifier la validité de notre équation, mais ils confirment la tendance prévue. Notre objectif reste de recueillir suffisamment d'informations pour obtenir une relation avec 5-6 points. La grosse difficulté est de rencontrer, dans les conditions naturelles, des situations où d'une fois à l'autre, toutes choses sont égales, sauf la variable que l'on veut étudier. Mais je pense qu'avec de la patience, on doit pouvoir y arriver. Il n'est pas exclu qu'avec les données ainsi recueillies, on puisse tenter un autre type d'exploitation, en ajustant à I , non plus la vitesse d'infiltration mais le taux de remplissage du sol par l'eau. La réponse aux problèmes posés serait alors plus directe. En particulier, l'estimation de la capacité limite d'infiltration pourrait être obtenue en résolvant l'équation pour une teneur en eau (humidité préexistante plus taux de remplissage) égale, ou quelque peu inférieure (ce qui correspondrait mieux à la réalité), à la porosité totale.

Pour revenir à la caractérisation des types pédologiques en laboratoire, une tentative a été réalisée, il y a un an par Maigniant et Guérin. Comme elle était prometteuse, la question a été reprise à la Station Agronomique de Châlons-sur-Marne. M. BALLIF qui s'en occupe, pourrait peut être vous fournir des informations à cet égard.

M. BALLIF apporte les précisions suivantes sur ces études :

a) *Etude de l'infiltration dans les colonnes de sol non remanié.*

À la Station d'Agronomie de Châlons-sur-Marne, l'étude expérimentale de l'infiltration dans des colonnes de sol non remanié a été reprise (Ballif et Maigniant).

Au cours de l'hiver 1969, les colonnes de sol ont été prélevées. Les mesures d'infiltration sont actuellement en cours de réalisation.

b) *Prélèvement des colonnes de sol non remanié.*

Sur l'un des côtés d'une fosse pédologique, des tubes en plexiglass, de 8 cm de diamètre et de 120 cm de long, sont descendus progressivement dans le sol par « battage », en vérifiant que les niveaux supérieurs du sol dans le tube et sur le terrain soient identiques, afin de ne pas tasser la carotte de sol prélevée et de ne pas modifier la densité apparente du sol.

Les tubes sont ensuite pesés régulièrement au cours du dessèchement, afin de commencer l'arrosage sur un profil de sol sec.

c) *Arrosage au laboratoire.*

Un système d'arrosage, maintenu à température constante, est installé afin d'assurer une intensité constante pendant toute la durée de l'expérimentation.

Ces colonnes de sol non remanié permettront d'étudier l'avancement du front d'humectation sur des profils de différents types de sols : rendzine sur craie, rendzine sur calcaire dur (Portlandien), sol brun lessivé, sol peu évolué sur sable aptien.

M. DEGALLIER s'étonne que M. DUBREUIL ait critiqué l'emploi des tensiomètres et des appareils électroniques, alors

que l'O.R.S.T.O.M. a été le pionnier de l'application de cet appareillage en Afrique. M. DUBREUIL répond qu'il a voulu simplement souligner l'extrême difficulté d'utiliser, efficacement, en pays d'outre-mer, des appareillages quelque peu complexes.

Effectivement, concède M. RODIER, nous avons beaucoup hésité avant d'employer la sonde à neutrons. Dès son arrivée à Madagascar, M. Pourrut a trouvé des sondes à neutrons donnant des résultats très inégaux. Il s'est exercé à utiliser cet appareil, et au bout d'un an, on pouvait considérer que les mesures à l'humidimètre étaient devenues des mesures de routine. Ce n'est qu'à partir de cette époque que M. Pourrut a été autorisé à utiliser cet appareil pour assurer les mesures d'humidité du sol. Nous avons, devant les résultats obtenus, encouragé nos hydrologues de Côte-d'Ivoire à utiliser le même appareillage. Mais à Abidjan comme à Tananarive, il y avait un excellent technicien du C.E.A. qui dépannait les appareils à chaque défaillance. Sans cela, il aurait été impossible de les utiliser en Afrique. Si avant ces essais, M. Pourrut nous avait proposé l'emploi de ces appareils délicats, cela lui aurait été refusé. Nous pensions suivre l'humidité du sol par de très nombreux prélèvements et des pesées des échantillons humides et secs. Ceci avait déjà été fait par un de nos pédologues, P. Audry qui, au Tchad, avec plusieurs milliers d'analyses par an, avait pu suivre de façon parfaite les variations d'humidité aux diverses profondeurs. Malheureusement, à Korhogo, un technicien trop tâillon n'avait pas pu arriver à la cadence nécessaire pour obtenir des mesures assez serrées dans le temps, par la méthode gravimétrique. Nous n'avons pas parlé des tensiomètres qui correspondent à une initiative heureuse de M. Degallier, et dont nous n'avons pas développé l'emploi, pensant arriver à des résultats plus nombreux et plus complets par la méthode gravimétrique.

J'apporterai un petit complément à ce qu'a dit M. DUBREUIL en parlant d'un de nos objectifs sur ces deux bassins: l'établissement d'un bilan complet sur de courtes périodes, semaines ou décades, permettant peut être d'arriver à réaliser un de nos rêves: déterminer la recharge naturelle de la nappe à partir uniquement des données pluviométriques, comme nous le faisons déjà pour le ruissellement. Sur les deux bassins, nous connaissons bien, jour par jour: précipitations, ruissellement et variations de niveau de la nappe; mais deux facteurs nous manquent: la quantité d'eau comprise dans la zone de sol non saturée, les pertes réelles par évapotranspiration, d'où la nécessité d'études lysimétriques et de mesures de l'humidité du sol en différents points du bassin et à diverses profondeurs.

Notons que nous avons tous les éléments pour faire un bilan complet mais à l'échelle *annuelle* seulement.

M. LEFROU a noté que M. RODIER cherchait à déterminer deux termes inconnus du bilan par mesure de l'humidité dans le sol non saturé. Il pose la question suivante:

« A-t-on une idée de la façon dont on pourra introduire quantitativement ces résultats dans les bilans, vu les difficultés rencontrées par M. MUTIN pour déterminer des flux à partir des seules mesures d'humidité? »

D'un échange de vue entre MM. RODIER, DUBREUIL et MUTIN, il ressort que les études sur ce point se poursuivent de divers côtés mais qu'il est encore trop tôt pour préjuger de leurs résultats.

A propos d'une remarque de M. DUBREUIL, M. HENIN fait la mise au point suivante:

« Je ne pense pas que les pédologues doivent répondre directement à la question que vous avez posée. Ils définissent le sol d'une manière globale en le considérant comme un système caractérisé par sa dynamique. Celle-ci imprime des caractères particuliers aux matériaux qui vont se manifester par exemple dans le comportement vis-à-vis de l'eau. »

M. RÉMÉNIÉRAS souligne qu'à défaut d'une estimation directe et précise du stock d'humidité du bassin, l'hydrologue peut souvent se contenter d'estimer les « pertes » d'une averse au moyen d'une corrélation dans laquelle interviendront — en quelque sorte, à titre « d'indice » — les valeurs de l'humidité du sol, mesurées sur un profil « type », judicieusement choisi dans le bassin étudié. Peut-être, la valeur de la résistance électrique entre deux ou plusieurs prises de terre (spécialement établies et entretenues) serait-elle un indice suffisant pour certaines applications.

M. DUBREUIL confirme l'intérêt d'une telle approche en résumant les résultats d'une tentative faite sur le bassin de la Tafaina. Le taux d'humidité, mesuré à 10 cm de profondeur, présente, dit-il, une liaison très étroite avec les coefficients de ruissellement que nous mesurons sur la même parcelle, et par conséquent, il y a effectivement, dans la prise en compte de ce taux d'humidité, la possibilité d'une estimation plus précise que celle donnée par des indices de saturation classiques. Un procédé analogue est d'ailleurs utilisé aux U.S.A. par certains hydrologues du Ministère de l'Agriculture.

M. le Président clôt la discussion et lève la séance en remerciant toutes les personnes qui ont contribué à faire des discussions un dialogue particulièrement fructueux.

Abstract

Analytical investigations by O.R.S.T.O.M. of infiltration, water movement in the ground and aquifer recharge in representative basins

For nearly twenty years O.R.S.T.O.M. hydrologists have been investigating runoff in 80-odd groups of representative basins in intertropical and arid regions. Due to difficulties experienced in establishing a rainfall/runoff transformation model they are now concentrating their efforts on the analysis of the remaining terms of a storm shower water balance, i.e. infiltration, storage and movement of the water in an unsaturated ground zone, and aquifer recharge.

This new line of research started in about 1966 and is now developing.

The accuracy and quality of gravimetric and neutron probe measurements are discussed. What is most important is that the likely measurement error can be established by variance analysis.

Reference is also made to systematic standardised measurements of the hydrodynamic characteristics of ferruginous tropical soils in 25 groups of basins, the purpose of which was to obtain a basis of comparison between basins with a view to analogue processing of the information.

Detailed studies are in progress on elementary basins of 3.6 sq.kms. and 5 sq.kms., the former on granitic sandstone in the North Ivory Coast region (Korhogo) and the latter on shale and granite in the Malagasy uplands (Tafaina). The first concrete results obtained are presented, concerning variations in the water profile under the effect of storm rainfall causing a flood, estimated true dry season evapotranspiration, the process whereby an initially dry soil becomes saturated and then dries out again.