

## **Les processus de redistribution des eaux en région sahélienne: l'hydrologie dans l'expérience Hapex-Sahel**

**J. C. DESCONNETS, S. GALLE, C. LEDUC & C. PEUGEOT**

*Orstom, BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex, France*

**Résumé** Dans le cadre de l'expérience Hapex-Sahel (Niger), les principaux processus de redistribution des eaux de surface et leur variabilité spatio-temporelle ont été étudiés à différentes échelles (de 100 m<sup>2</sup> à 10 000 km<sup>2</sup> et de la minute jusqu'à l'année) en liaison avec les états de surface, la couverture végétale et les précipitations. Quelle que soit l'échelle d'observation, il existe une forte discontinuité spatio-temporelle de l'infiltration. La redistribution de l'eau sur le versant se fait par un ruissellement hortonien qui est ensuite concentré dans les ravines. La présence d'une zone d'épandage à mi-versant entraîne d'importantes pertes lors du transfert des eaux de ruissellement vers une mare endoréique. Lorsque le ruissellement n'est pas totalement infiltré dans le réseau de drainage, il se concentre dans les mares où il est soit repris par évaporation, soit drainé vers la nappe phréatique. Fortement liée à l'intermittence temporelle des précipitations, la recharge annuelle de la nappe se réalise essentiellement par l'infiltration des eaux des mares et constitue moins de 10% du bilan annuel régional.

### **Water redistribution processes in Sahelian zone: hydrology in the Hapex-Sahel experiment**

**Abstract** During the Hapex-Sahel experiment (Niger), water redistribution processes were detailed at various scales of space (from 100 m<sup>2</sup> to 10 000 km<sup>2</sup>) and time (from a minute to a year) in relation to surface features, vegetation cover and rainfall. All observational scales demonstrated that a marked discontinuity exists in infiltration in space and time. Runoff, mainly by Hortonian overland flow, concentrates into gullies which are generally degraded at mid-slope into spreading zones. Runoff that does not infiltrate within the drainage network reaches the endoreic pools where it either percolates to groundwater or evaporates. Related to the high temporal variability of the rainfall and intermittent nature, the annual aquifer recharge is mainly due to infiltration through these pools but amounts to less than 10% of the regional water balance.

## **INTRODUCTION**

Dans l'espace, les mesures ont été effectuées de la parcelle expérimentale de quelques centaines de mètres carrés à un degré carré et, dans le temps, de la fraction de minute à plusieurs années.

A l'est du fleuve Niger, il n'existe pas de cours d'eau significatif, même temporaire. La région est une mosaïque de petits ensembles endoréiques. Selon l'intensité de la pluie et l'état de la surface, une fraction variable de ces bassins contribue aux écoulements qui peuvent parfois complètement disparaître et se reconstituer plus ou moins à l'aval pour finalement aboutir à une mare temporaire, lieu privilégié de recharge de la nappe phréatique. La structure et le fonctionnement hydrologique de cette région sont hérités de la forte intermittence du régime des précipitations et d'un paysage au relief peu prononcé.

En effet, le paysage de la partie centrale du degré carré (deux tiers en surface) dans laquelle s'est concentrée la majorité des études de l'expérience Hapex-Sahel est morphologiquement caractérisé par de larges vallées à faible pente (0,3-0,8%) creusées dans le Continental Terminal et recouvertes d'un manteau éolien qui a été déposé et remanié à différentes époques (Gavaud, 1966). En amont, les vallées sableuses sont limitées par le relief tabulaire: les plateaux sommitaux à cuirasse ferrugineuse. Une toposéquence représentative du paysage du degré carré a été décrite par Courrault *et al.* (1990). Elle est schématisée en Fig. 1. De cette toposéquence, on retiendra trois grandes unités (de l'amont vers l'aval):

- le plateau à cuirasse ferrugineuse à brousse tigrée, de petits systèmes dunaires et du talus qui est une zone de forte pente faisant la transition avec l'unité aval;
- son glacis sableux constitué d'un piémont dégradé souvent dans la continuité topographique du talus, le cône d'épandage sableux qui traduit la disparition de l'écoulement concentré issu des ravines et les surfaces agricoles: champs et jachères;

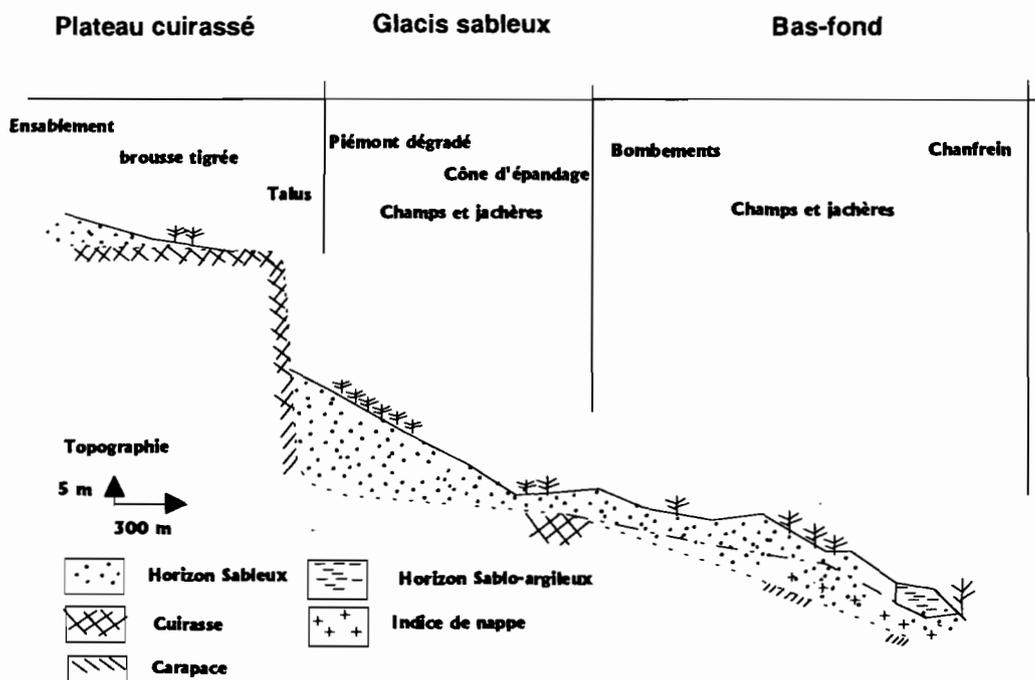


Fig. 1 Toposéquence représentative du paysage du degré carré (d'après Courrault *et al.*, 1990).

- le bas fond que l'on peut décomposer en deux domaines: les bombements ou zones dégradées aussi marquées par des replats ou des contre pentes, le chanfrein qui est la zone de raccord entre l'axe de drainage principal et la zone de bombements.

Le dispositif expérimental est installé sur la partie amont de la toposéquence. Il est composé de trois parcelles de ruissellement disposées sur le sol nu de plateau, le glacis sableux en jachère et le glacis sableux cultivé en mil d'un transect de tubes d'accès pour humidimètres neutroniques et de cinq petits bassins versants incluant les unités amont précédemment citées (superficie inférieure à 1 km<sup>2</sup>). Seul le transect humidimétrique couvre l'ensemble de la toposéquence.

## ETUDE A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

En zone sahélienne, les processus hydrologiques sont sous la dépendance quasi-exclusive de l'état de la surface du sol: encroûtement, micro-relief, végétation ... (Casenave & Valentin, 1989, 1992). L'étude des formations superficielles est pour cela un préalable indispensable à la compréhension des processus à l'échelle locale. Trois parcelles de ruissellement (zones rectangulaires, 5 × 20 m, délimitées par une bordure métallique et destinées à l'étude locale du ruissellement) ont été installées sur trois des principaux types de surface représentés dans la région: sol nu de plateau, jachère et champ de mil sur un glacis sableux (Peugeot, 1995).

Le plateau, de pente faible, est caractérisé par un couvert végétal concentré en bandes, grossièrement parallèles aux courbes de niveau, qui alternent avec de larges bandes de sol nu. La parcelle située dans le sol nu permet de montrer que l'infiltration ne dépasse pas le premier mètre du fait de la présence d'un fort encroûtement superficiel. A l'échelle de la saison des pluies, la lame ruisselée sur le sol nu représente plus de la moitié de la lame précipitée (Fig. 2). Ce ruissellement se transfère vers l'aval et s'arrête dans la bande qui bénéficie en conséquence d'une alimentation en eau, estimée en 1993 à plus de trois fois la pluie annuelle.

Sous la végétation, l'eau s'infiltré au-delà de la profondeur maximale des mesures d'humidité (6 m). Le stock d'eau mesuré dans le sol au moment de la dernière pluie, augmenté de l'estimation de l'infiltration profonde (au-delà de 6 m) représente 2,5 fois la lame précipitée. L'infiltration profonde est évaluée à partir des profils de teneur en eau, sous l'hypothèse de gradient unitaire de pression de l'eau du sol, selon la méthode proposée par Klaij & Vachaud (1992). Une fraction de l'eau infiltrée est restituée à l'atmosphère par évapotranspiration en saison des pluies (85% de la pluie), puis en saison sèche, le reste pouvant drainer en profondeur. La partition exacte entre ces deux processus n'a pu être établie.

Sur le glacis sableux, l'encroûtement prononcé de la parcelle de jachère limite la profondeur d'infiltration à 2 m. Au pas de temps de la saison, le ruissellement représente 21-25% de la lame précipitée, la quantité restante étant entièrement restituée à l'atmosphère par évaporation (Fig. 3).

Sur la parcelle de mil (glacis sableux), le travail du sol (semis, sarclage) induit une forte variabilité temporelle et spatiale de l'infiltration et du ruissellement. Grâce à la destruction des croûtes, on constate une augmentation significative de l'infiltration après les sarclages, mais au fur et à mesure des averses successives et de la reconstitution des pellicules superficielles, le ruissellement augmente. A partir d'un cumul pluviométrique

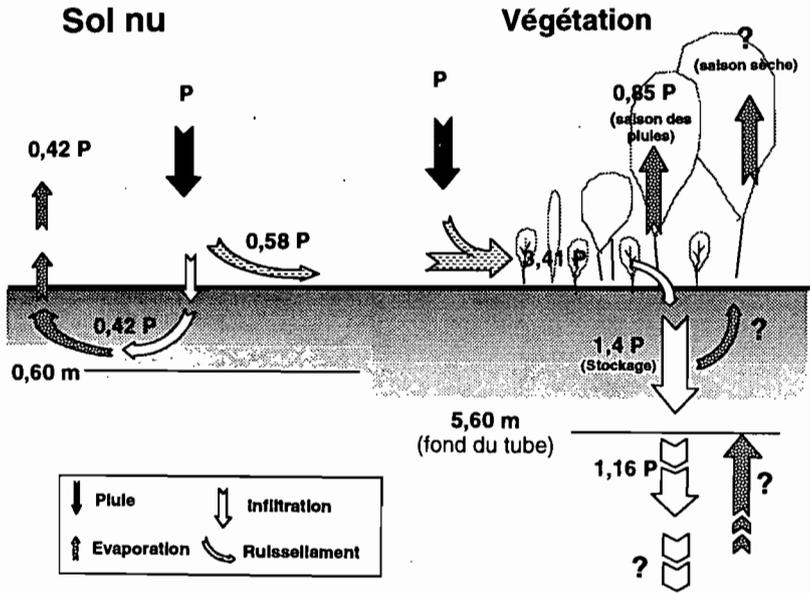


Fig. 2 Bilan hydrologique dans un système sol nu/végétation de plateau, saison 1993.

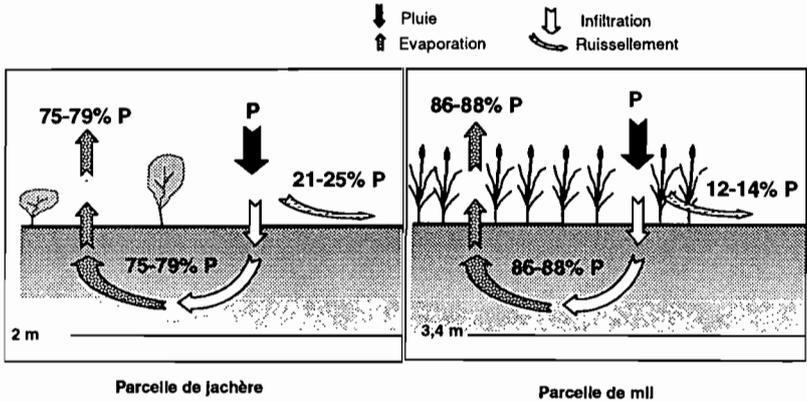


Fig. 3 Bilan hydrologique saisonnier sur les parcelles de jachère et mil, saison 1992 et 1993.

de 80 mm environ, il apparaît que l'effet bénéfique du sarclage sur l'infiltration est annihilé. Au pas de temps annuel, le ruissellement sur la parcelle de mil représente 12-14% environ de la lame précipitée (Fig. 3). L'infiltration atteint la profondeur maximale des mesures (3,40 m), mais l'eau du sol est entièrement extraite par l'évaporation en saison sèche.

**ETUDE A L'ECHELLE DU VERSANT**

Le suivi des variations d'humidité du sol d'une toposéquence typique du paysage central

du degré carré permet d'étendre et de compléter la connaissance des processus observés à l'échelle de la parcelle. Le suivi des profils hydrique du sol a été effectué par la méthode neutronique, jusqu'à une profondeur standard de 3,40 m qui a été augmentée à 5,50 m dans les zones de forte infiltration. La calibration des mesures a été faite *in situ*, elle est détaillée dans Cuenca *et al.* (1996). Le suivi s'est effectué avec un pas de temps dépendant de la pluie afin de mesurer systématiquement le contenu en eau du sol: le lendemain de la pluie, 3 jours après, puis à une fréquence plus lâche, pour devenir mensuelle durant la saison sèche. Les mesures ont été réalisées durant quatre années (1991-1994).

La teneur en eau du sol a été mesurée sur les unités suivantes: le plateau à cuirasse ferrugineuse (13 tubes), le glacis sableux cultivé en mil (neuf tubes) ou en jachère (deux tubes), le cône d'épandage (quatre tubes), la zone de bas-fond (deux tubes), le talweg (deux tubes) et une mare temporaire (deux tubes).

Les principaux enseignements sont les suivants:

- La valeur minimum du stock hydrique est atteinte en fin de saison sèche, elle reste très stable pour chaque site d'une année sur l'autre. La saison sèche est suffisamment longue pour évapo-transpirer toute l'eau mobilisable dans le profil concerné par les mesures, quelle que soit la quantité d'eau tombée et infiltrée au cours d'une saison précédente.
- La valeur maximum est atteinte avant la fin de la saison des pluies, lorsque les pluies sont encore régulières; elle varie chaque année. Cette valeur maximale dépend du total pluviométrique annuel et de sa distribution saisonnière. Aussi, la concentration de pluies en fin de saison favorise l'infiltration (la conductivité hydraulique est maximale sur un sol humide). Ceci se vérifie pour l'ensemble de la toposéquence.

### Comportement hydrodynamique le long de la toposéquence

En amont de la toposéquence, le plateau est recouvert d'une végétation naturelle organisée en bandes qui induit une répartition répétitive de l'eau: bande de végétation – bande de sol nu (échelle d'une cinquantaine de mètre). Les relations entre le stock hydrique et la végétation sont décrits par Seghieri *et al.* (1994). Les surfaces de sol nu génèrent un ruissellement qui est en grande partie absorbé par les bandes de végétation (Galle & Peugeot, 1994). La fraction de ruissellement non intercepté se concentre en ravines dans le sol meuble des glacis.

Le stock hydrique du cône d'épandage (Fig. 1) atteint 900 mm en fin de saison des pluies pour la couche de sol 0-340 cm, alors que celui du glacis sableux cultivé situé en amont varie entre 200 et 350 mm (Fig. 4).

Le bas-fond, situé en aval, ne bénéficie pas d'apport par ruissellement. Ces faibles stocks hydriques (compris entre 150 et 200 mm) sont la conséquence d'une mauvaise capacité d'infiltration de sols en jachère, qui s'encroûtent sous l'action de pluies de forte intensité. Ces stocks hydriques mesurés dans le bas fond sont comparables à ceux mesurés sur les glacis sableux en jachère (160-190 mm, non représentés sur la Fig. 4). On atteint ensuite le talweg principal, qui présente un stock hydrique de 800 mm.

La toposéquence montre trois zones de fort stock hydrique: les fourrés de brousse tigrée, le cône d'épandage à mi-versant et le talweg principal. Parmi les autres zones,

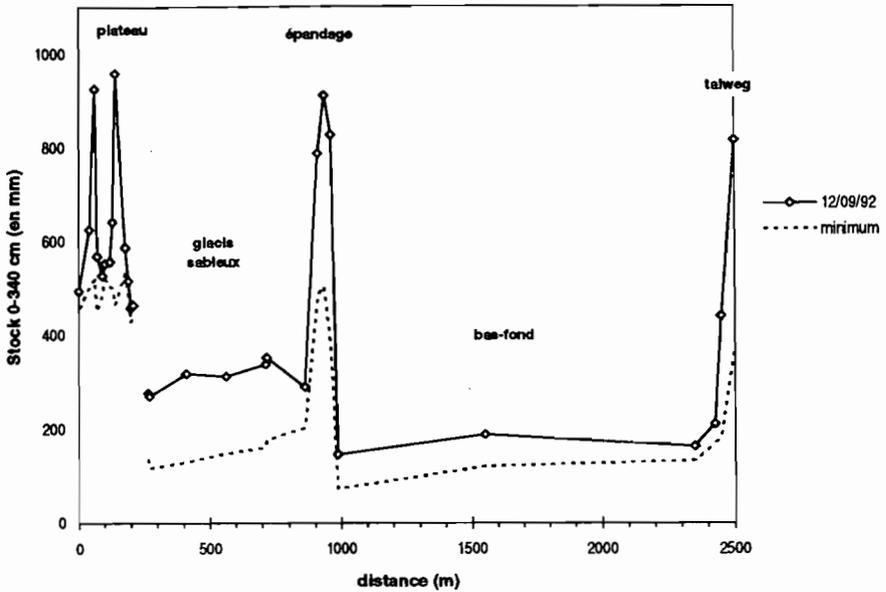


Fig. 4 Stock hydrique le long de la toposéquence de Banizoumbou le 12 septembre 1992.

l'opposition culture/jachère est liée au travail du sol qui empêche l'encroûtement et favorise ainsi l'infiltration. Nous n'avons pas pu mettre en évidence une différence bas-fond/glacis sableux. La Fig. 4, sur laquelle sont portés les stocks d'eau maximum le long de la toposéquence en 1992, illustre la variabilité spatiale de l'infiltration à cette échelle.

Enfin, l'analyse des crues en ravine (Peugeot, 1995) montre que l'infiltration à travers le fond du lit des ravines concerne des volumes d'eau significatifs, à tel point que l'écoulement peut être nul aux stations les plus en aval. Au pas de temps de la saison des pluies, la lame d'eau infiltrée sous une ravine est estimée, par modélisation hydrologique, à environ 11% de la lame précipitée sur le bassin versant. Un second fait marquant est la discontinuité spatiale de l'écoulement: l'eau transitant dans les ravines est totalement absorbée dans le cône d'épandage sans s'écouler au-delà (Peugeot *et al.*, 1996).

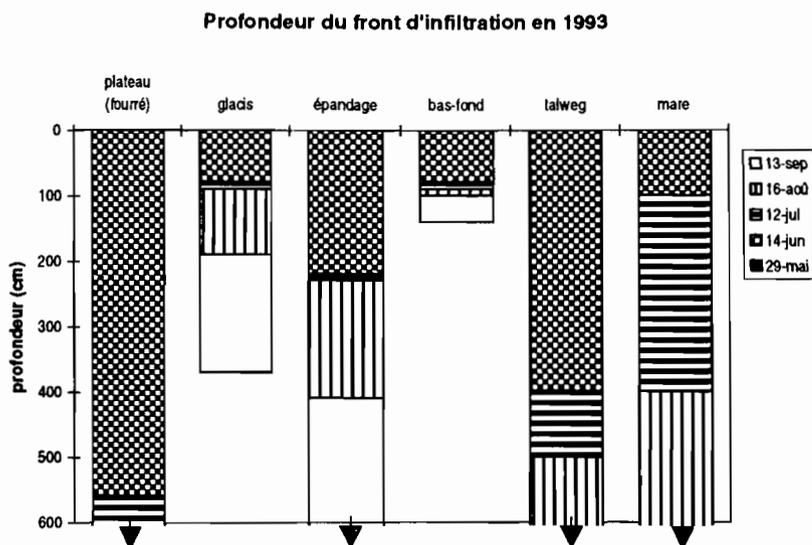
### Drainage profond

Même dans le cas d'une saison des pluies favorable à l'infiltration (année 1992, par exemple), la profondeur du front d'infiltration dépasse difficilement 3,40 m sous le mil (profondeur racinaire 1,50 m). (Le front d'infiltration est la limite entre le sol humidifié et le sol sec sous-jacent. La teneur en eau du sol humidifié dépend de la chronologie des événements pluvieux et du type de sol.) En 1992, le stock d'eau au delà de 3,4 m a été estimé à moins de 30 mm (Peugeot, 1995). Cette eau est entièrement reprise par évaporation durant la saison sèche.

Dans le cône d'épandage les quantités d'eau infiltrées, provenant du ruissellement, sont importantes et le front d'infiltration descend rapidement.

L'évolution du front d'infiltration au cours de la saison 1993 est schématisée en Fig. 5. Après les premières pluies de la saison, totalisant 100 mm, la redistribution des eaux de surface est assez inégale le long de la toposéquence et révèle déjà les points d'infiltration préférentiels dans le paysage. Ainsi, on constate qu'au 14 juin 1993 le front d'infiltration est déjà de 5 m dans le cône d'épandage et 4 m dans le talweg. L'amplitude observée entre les différents points de la toposéquence tend à augmenter au fur et à mesure de la saison.

La totalité de l'eau infiltrée dans ces unités est évaporée ou transpirée. Dans les zones de concentration du ruissellement (cône d'épandage et talweg), le front d'infiltration dépasse 5,50 m et nous n'avons pas eu la possibilité de mesurer directement les quantités infiltrées. Mis à part les mares temporaires, dont le fonctionnement est détaillé plus loin, les fourrés des plateaux, le cône d'épandage et le talweg sont les seuls éléments du paysage où l'infiltration peut exister. La part de cette infiltration qui atteint vraiment la nappe n'a pu être calculé.



## ETUDE A L'ECHELLE DU SYSTEME ENDOREIQUÉ

En l'absence d'écoulement hors des bassins versants, l'établissement du bilan hydrologique des mares temporaires est apparu nécessaire pour intégrer les écoulements de surface au bilan hydrologique régional et comprendre la recharge de la nappe phréatique.

Le suivi hydrologique des mares s'est effectué sur une zone de 600 km<sup>2</sup> à l'intérieur de laquelle un inventaire a permis d'évaluer à environ une soixantaine le nombre des mares temporaires. Elles sont réparties préférentiellement sur les plateaux à cuirasse ferrugineuse, dans les lits des anciens cours d'eau actuellement non fonctionnels et les bas-fonds de vallée « verrouillée » par les sables.

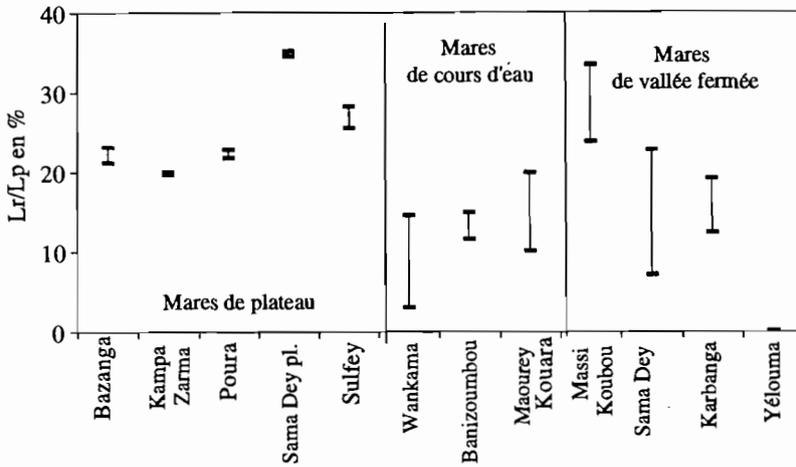


Fig. 6 Ecart maximum des coefficients annuels ( $Lr/Lp$  – lame ruisselée à la mare/lame précipitée sur le bassin) de ruissellement aux mares étudiées.

Un ensemble de 12 mares représentatives de la zone a été instrumenté afin de suivre les variations de niveau dont trois avec des enregistreurs en continu. Sur deux de ces dernières, un suivi chimique et isotopique des eaux ainsi qu'une mesure de l'évaporation sur bac ont permis d'estimer avec précision les flux évaporatoires des plans d'eau tout au long de la saison sèche.

L'étude fine des processus de déstockage a montré qu'en saison des pluies la vidange des mares est essentiellement induite par un processus d'infiltration dont l'intensité est proportionnelle au débordement du niveau hors de la zone argileuse colmatant le fond du lit de la mare. Ainsi, des intensités de vidange instantanées de  $15 \text{ cm jour}^{-1}$  (milieu latéritique) à  $100 \text{ cm jour}^{-1}$  (milieu sableux) ont été observées (Desconnets *et al.*, 1996). En terme de bilan hydrologique à la mare, ce fonctionnement se traduit par des lames infiltrées annuelles représentant entre 76 et 92% des lames annuelles écoulées selon que l'on s'intéresse aux systèmes endoréiques de plateau ou à ceux des bas-fond sableux. Les écoulements annuels d'un système endoréique sont extrêmement variables selon le substratum du bassin et la distribution saisonnière des précipitations. Sur l'ensemble des systèmes endoréiques observés, l'estimation des lames écoulées met en évidence un transit des eaux pluviales vers la mare variant de 0,1 à 34% de la lame précipitée sur le bassin avec une variabilité interannuelle très élevée en ce qui concerne les écoulements sur bassin sableux de l'ordre de 50% (Fig. 6).

Concernant les échanges entre la mare et la nappe phréatique, un intérêt tout particulier a été porté sur les mares de bas-fond où plusieurs dispositifs de suivi des flux hydriques sous la mare (zone non saturée) et des niveaux piézométriques (zone saturée) ont complété les suivis de variation de niveau.

La Fig. 7 présente l'évolution des lames infiltrées à la mare de Wankama (saison 1993) avec en parallèle l'évolution des niveaux piézométriques à 30 et 500 m de la mare. Ce sont essentiellement les volumes infiltrés dans les zones perméables qui contribuent à la recharge de la nappe. Les suivis piézométriques à proximité de plusieurs mares montrent que les réactions locales de l'aquifère sont d'amplitude variable d'une mare à l'autre, d'une dizaine de centimètres à une dizaine de mètres, et se manifestent tout au long de la saison des pluies.

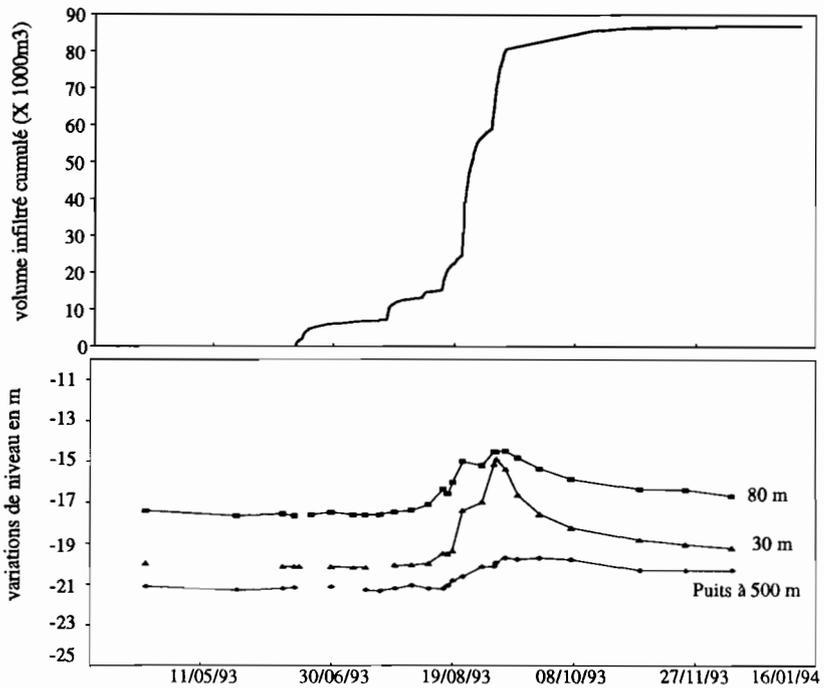


Fig. 7 Evolution des niveaux de la mare de Wankama et des niveaux piézométriques à proximité de la mare (saison 1993).

La régionalisation du bilan annuel nous a permis de quantifier la réalimentation de la nappe par les pluies (Tableau 1). En considérant une occupation de 80% de la zone d'étude des mares par les systèmes endoréiques de vallée (tous systèmes confondus), les lames infiltrées calculées à partir de cinq mares de vallée observées sont respectivement de 10% de la pluie annuelle en 1992 et 6% en 1993. Sur la base de la variation piézométrique annuelle médiane observée, on estime (porosité moyenne du réservoir aquifère de 15%) à la recharge annuelle égale à 10% des précipitations en 1992 et à 3,5% en 1993. La concordance entre ces deux démarches tend à prouver le rôle majeur des mares dans les processus de recharge à l'échelle régionale.

Tableau 1 Comparaison de la recharge annuelle de la nappe et des lames infiltrées dans les mares de vallée.

	Précipitation annuelle moyenne (mm)	Recharge médiane annuelle (% des précipitations)	Lame infiltrée médiane dans les mares de vallée (% des précipitations)
Année 1992	500	10	10
Année 1993	470	3.5	6

Le calcul est réalisé avec les paramètres suivants: porosité efficace de l'aquifère de 15%; pas de participation des plateaux à la recharge; 80% de la surface de la zone étudiée drainée par les mares de vallée.

## ETUDE A L'ECHELLE DU DEGRE CARRE: HYDRODYNAMIQUE ET RECHARGE DE LA NAPPE PHREATIQUE

Les profils d'humidité réalisés le long du versant de Wankama ont montré que l'eau s'infiltré bien davantage à proximité immédiate de la mare. Les bilans hydrologiques (Desconnets, 1994) ont confirmé l'importance des volumes quittant les mares vers la nappe. Ce rôle fondamental des mares dans la réalimentation de la nappe phréatique a été démontré et précisé par les mesures hydrogéologiques, entreprises selon deux échelles d'observation spatiale:

- Le degré carré dans son ensemble (Leduc *et al.*, 1996). Au nord du fleuve Niger, plus de 250 puits ont été régulièrement mesurés pendant plusieurs années afin de décrire les particularités hydrodynamiques des diverses zones, apprécier l'impact de la saison des pluies sur la nappe phréatique et prendre en compte l'évolution interannuelle.
- Quelques sites expérimentaux centrés sur une mare temporaire. Disposant de plusieurs points de mesure rapprochés, ils permettent une approche fine de la géométrie du dôme piézométrique créé par l'infiltration sous la mare (Fig. 8) et par là, la quantification locale de la recharge. Une telle démarche nécessite l'installation d'enregistreurs en continu.

La nappe, rencontrée à une profondeur variant entre 0 et 75 m (médiane de 35 m), est presque toujours déconnectée hydrauliquement du réseau hydrographique temporaire et les échanges ne peuvent se faire que de la surface vers le souterrain.

La variabilité des fluctuations saisonnières de la nappe, tant à l'échelle du degré carré qu'à l'échelle locale, a été exposée précédemment (Leduc & Karbo, 1995).

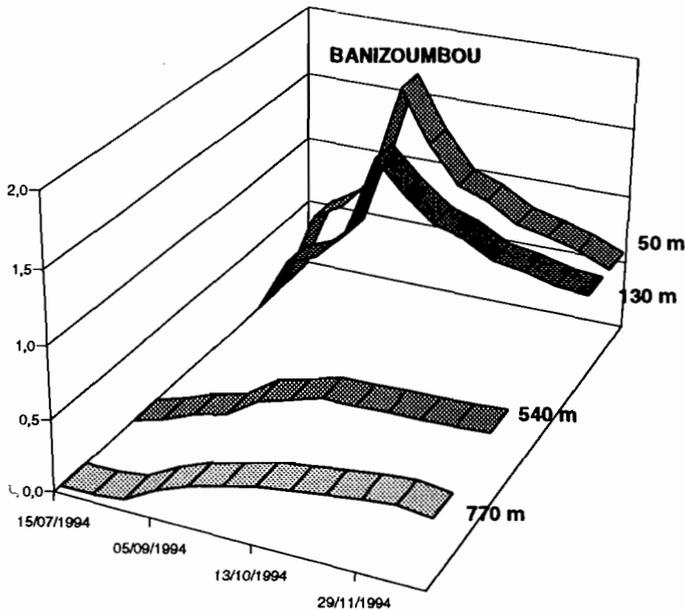


Fig. 8 Dôme piézométrique à la mare de Banizoumbou et son évolution du 15 juillet 1994 au 1 janvier 1995 (amplitude piézométrique et distance à la mare en m).

Rappelons que l'amplitude annuelle est généralement de l'ordre de quelques décimètres mais peut atteindre 9 m et dépend principalement des caractéristiques hydrodynamiques locales. Le niveau le plus haut est souvent atteint durant la saison des pluies mais parfois quelques semaines ou quelques mois après sa fin. Quelles que soient les disparités locales, les processus observés sont les mêmes: en dehors des mares, l'infiltration diffuse semble être extrêmement lente et réduite; par contre, à proximité des mares, les fluctuations de la nappe sont significatives et liées à l'arrivée, parfois rapide, d'eau de la mare.

Au niveau du degré carré, la permanence de certaines singularités hydrogéologiques comme la dépression piézométrique de la région de Dantiadou souligne la faiblesse des transferts horizontaux. Un calcul annuel peut donc négliger les échanges latéraux de et vers l'extérieur du degré carré. La précision de cette estimation dépend directement de celle de la porosité, très peu mesurée *in situ*.

L'analyse des teneurs en tritium, qui sera détaillée dans un prochain article, amène à des valeurs moyennes d'infiltration sur les dernières décennies légèrement plus basses (inférieure à 5%) mais cohérentes que les calculs basés sur les fluctuations piézométriques; elle montre également qu'il existe au moins un facteur 10 entre les taux extrêmes de renouvellement de la nappe dans le degré carré.

## CONCLUSION

Une partie importante des observations hydrologiques de l'expérience Hapex-Sahel a été réalisée à l'échelle de quelques parcelles et petits bassins versants. Elles ne peuvent donc figurer à l'environnement sahélien aux environs de Niamey dans toute sa diversité et sa complexité mais elles sont représentatives des principaux processus d'écoulement et d'infiltration du paysage central du degré carré (soit environ deux tiers).

L'étude hydrologique à l'échelle des parcelles puis à celle du versant montre qu'il existe des zones sur lesquelles le ruissellement est prépondérant (sol nu de plateau, jachère, mil) et des zones dans lesquelles l'infiltration est profonde et rapide, qui correspondent à des zones d'accumulation temporaire d'eau (végétation de plateau, ravine, cône d'épandage et talweg), susceptibles de contribuer à la recharge de l'aquifère. L'utilisation du modèle hydrologique distribué à bases physiques Swatch (Morel-Seytoux & Alhassoun, 1987) a permis d'estimer à 12% des précipitations en 1993, la lame globale infiltrée sous le plus grand des bassins versants étudiés (0,9 km<sup>2</sup>).

L'étude de quelques systèmes endoréiques et plus particulièrement du bilan de leur mare temporaire montre que la contribution des mares à la recharge annuelle de la nappe est primordiale, notamment en 1992 où les lames infiltrées dans les mares de bas-fond permettent à elles seules d'expliquer la recharge profonde de la nappe (Tableau 1). En 1993, le bilan régional des mares temporaires de la région est moins significative (3,5% des précipitations, voir Tableau 1) mais suit la même tendance que l'estimation de la recharge annuelle. A la vue de la concordance des estimations entre la recharge annuelle et la lame infiltrée sous les mares, la contribution des arcs de végétation, des ravines et des cônes d'épandage dans la recharge profonde est faible avec des transferts nécessairement plus lents que ceux observés sous les mares.

Outre l'estimation régionale (degré carré) de la recharge de la nappe, le suivi hydrogéologique a amené la connaissance et la compréhension des processus de transferts

locaux à partir des mares. L'étude hydrogéologique a permis de saisir la variabilité spatio-temporelle des processus de recharge au niveau régional et de mettre ainsi en évidence la composante des mouvements piézométriques à moyen terme qui se conjugue avec les variations strictement annuelles. Cette double origine, locale et régionale, de la fluctuation de la nappe en fait le paramètre le plus intégrateur des phénomènes hydrologiques à l'échelle du degré carré. La recharge de la nappe représente moins de 10% du total pluviométrique annuel.

## PERSPECTIVES

Comme il a été souligné dans les paragraphes précédents, des interrogations demeurent notamment en ce qui concerne la part de l'infiltration qui va rejoindre la nappe dans des arcs de végétation de brousse tigrée et dans les cônes d'épandage à mi-versant. Sans pouvoir y répondre directement, la continuité du suivi de quelques mares et d'une centaine de puits en 1994 et 1995 apportera des éléments nouveaux pour affiner la compréhension et la quantification des processus de recharge.

Après l'étude des processus de redistribution des eaux de surface, la modélisation du bilan hydrologique régional, avec la prise en compte des processus de la surface et du souterrain, nécessite la mise en place d'un système d'information géographique. D'une part, il permettra de rassembler et gérer des données hydrologiques cartographiques et satellitaires. D'autre part, il favorisera la mise en commun des produits scientifiques élaborés tel que les champs pluviométriques et piézométriques et surtout, il donnera la possibilité d'organiser une approche commune pour intégrer l'ensemble des résultats obtenus aux différentes échelles d'espace.

**Remerciements** Les auteurs remercient Michel Estèves pour la mise à disposition et l'analyse des données de crues sur les petits bassins versants et l'équipe Epsat Niger qui a bien voulu nous fournir les données pluviométriques.

## REFERENCES

- Casenave, A. & Valentin, C. (1989) *Les états de surface de la zone sahélienne. Influences sur l'infiltration*. Orstom, Paris.
- Casenave, A. & Valentin, C. (1992) A runoff capability classification based on surface features criteria in semiarid areas of west Africa. *J. Hydrol.* 130, 231-249.
- Cuenca, R. H., Brouwer, J., Chanzy, A., Galle, S., Gaze, S., Sicot, M., Stricker, H., Angullo-Jaramillo, R., Boyle, S. A., Bromley, J., Chebhouni, A. G., Cooper, J. D., Dixon, A. J., Fies, J. C., Gandah, M., Gaudu, J. C., Laguerre, L., Soet, M., Stewart, H. J., Vandervaere, J. P. & Vauclin M. (1996) Soil measurements during Hapex-Sahel intensive observation period. (Accepté pour publication dans *J. Hydrol.*)
- Desconnets, J. C. (1994) Caractérisation hydrologique de quelques systèmes endoréiques en milieu sahélien (degré carré d'Hapex-Sahel, Niger). Thèse de doctorat, USTL Montpellier, France.
- Desconnets, J. C., Taupin, J. D., Lebel, T. & Leduc, C. (1996) Hydrology of Hapex-Sahel central super site: surface drainage and aquifer recharge through the pool systems (accepté pour publication dans *J. Hydrol.*)
- Galle, S. (1993) Distribution spatiale du stock hydrique sur le bassin versant de Banizoumbou. Premiers résultats de la campagne de 1992. In: *Campagne de mesure Hapex-Sahel, SuperSite Central Est* (ed. par B. Monteny). Rapport Orstom no. 115.
- Goutorbe, J. P., Lebel, T., Tinga, A., Bessemoulin, P., Brouwer, J., Dolman, A. J., Engman, E. T., Gash, J. H. C., Hoepffner, M., Kabat, P., Kerr, Y. H., Monteny, B., Prince, S., Saïd, F., Sellers, P. & Wallace, J. S. (1994) Hapex-Sahel: a large scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Ann. Geophys.* 12, 53-64.

- Klajj, M. C. & Vachaud G. (1992) Seasonal water balance of a sandy soil in Niger cropped with pearl millet, based on profile moisture measurements. *Agric. Wat. Manage.* **21**, 313-330.
- Leduc, C. & Desconnets, J. C. (1994) Variability of groundwater recharge in sahelian climate: piezometric survey of the continental terminal aquifer near Niamey (Niger). In: *Future Groundwater Resources at Risk* (ed. par J. Soveri & T. Suokko) (Proc. Helsinki Symp., June 1994), 505-511. IAHS Publ. no. 222.
- Leduc, C. & Karbo, A. (1995) Variabilité spatio-temporelle de l'impact de l'infiltration sur la nappe phréatique du Continental Terminal (Hapex-Sahel, Niger). *Dixièmes Journées Hydrologiques Orstom, Montpellier*, septembre 1994.
- Leduc, C., Bromley, J. & Schroeter, P. (1996) Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the Hapex-Sahel hydrodynamic survey (Niger). (Accepté pour publication dans *J. Hydrol.*)
- Morel-Seytoux, H. J. & Alhassoun S. (1989) Swatch: a multi-process watershed model for simulation of surface and subsurface flows in a soil-aquifer-stream hydrologic system. *Report no. 87.3, Hydrowar reports division, Hydrology days publications*. Reprinted 1992.
- Peugeot, C. (1995) Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien (Niger). Expérimentations *in situ* et modélisation. Thèse, Université Grenoble I, France.
- Peugeot, C., Estèves, M., Galle, S., Rajot, J. L. & Vandervaere, J. P. (1996) Runoff generation processes: results and analysis of field data collected at the East Central SuperSite of the Hapex-Sahel experiment. (Accepté pour publication dans *J. Hydrol.*)
- Seghier, J., Galle, S. & Rajot, J. L. (1994) *La brousse tigrée dans le Sahel nigérien: Etude de la co-fluctuation du stock hydrique et de la végétation annuelle*, 509-532. Orstom, Coll. Colloques et Séminaires.