

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 m² à 10 000 km² 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 représente moins de 10% du bilan annuel régional.

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;

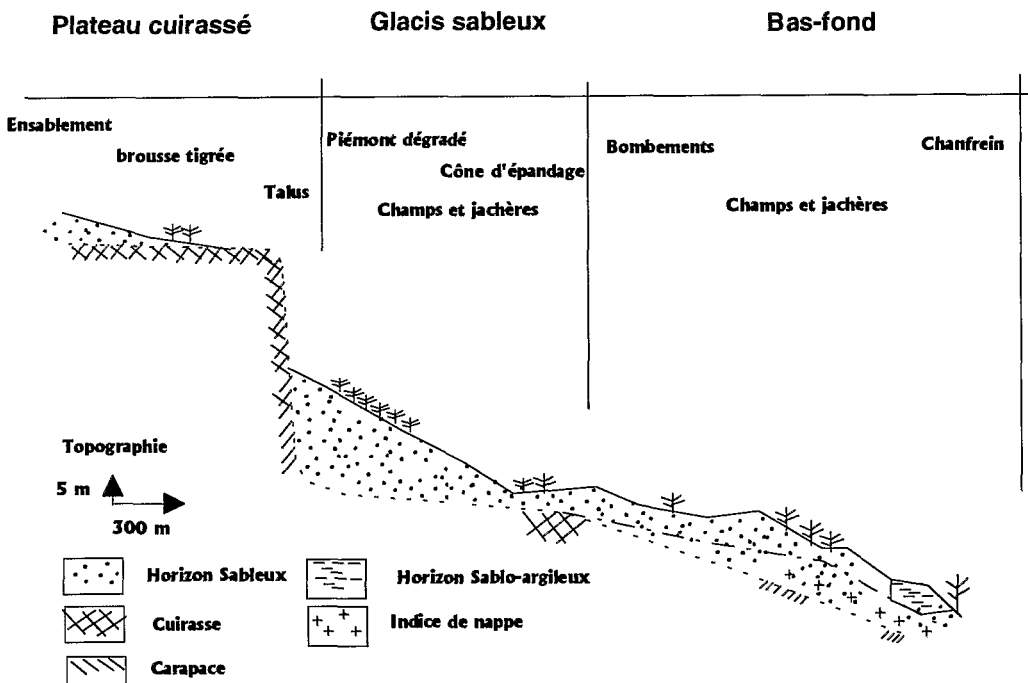


Fig. 1 Toposéquence représentative du paysage du degré carré (d'après Courrault *et al.*, 1990).

- 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 km²). 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

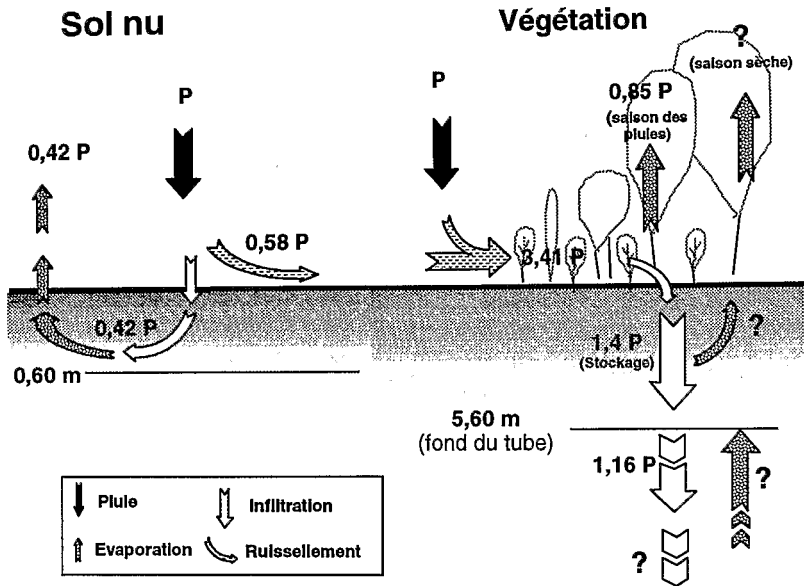


Fig. 2 Bilan hydrologique dans un système sol nu/végétation de plateau, saison 1993.



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

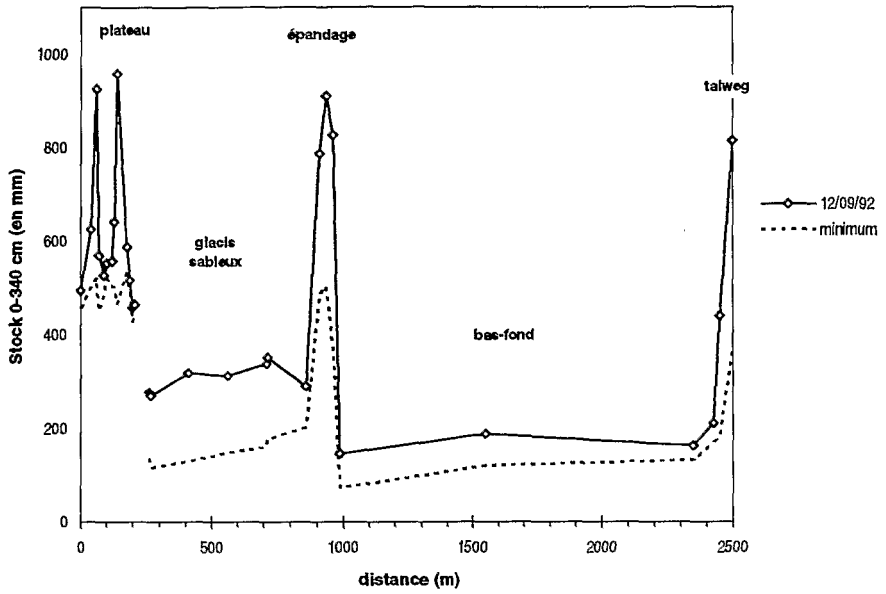


Fig. 4 Stock hydrique le long de la toposéquence de Banizoumbou le 12 septembre 1992.

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

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 1995 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.

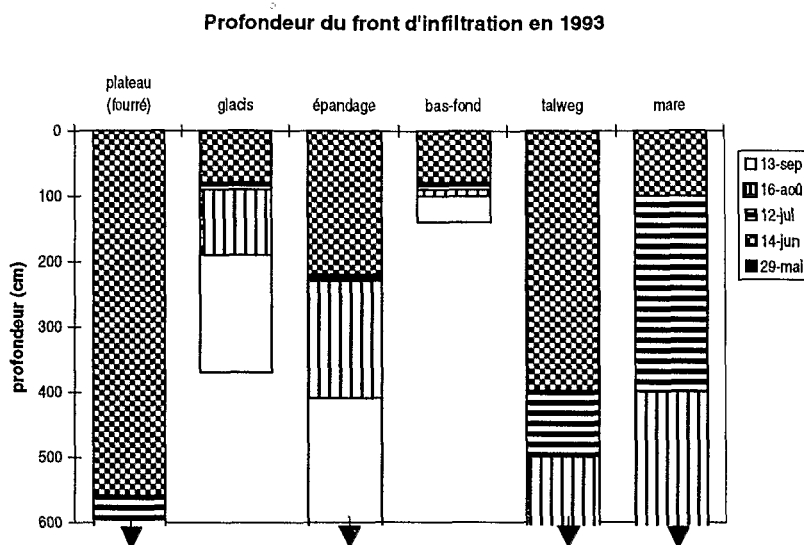


Fig. 5 Evolution du front d'infiltration sur la toposéquence en 1993.

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 km² 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.

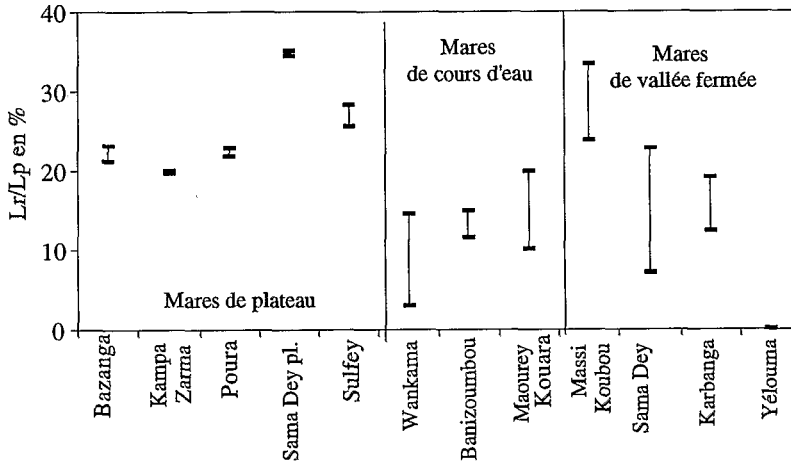


Fig. 6 Ecart maximum des coefficients annuels (Lr/Lp — lame ruisselée à la mare/lame précipitée sur le bassin) de ruissellement aux mares étudiées.

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 cm jour⁻¹ (milieu latéritique) à 100 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-fonds 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.

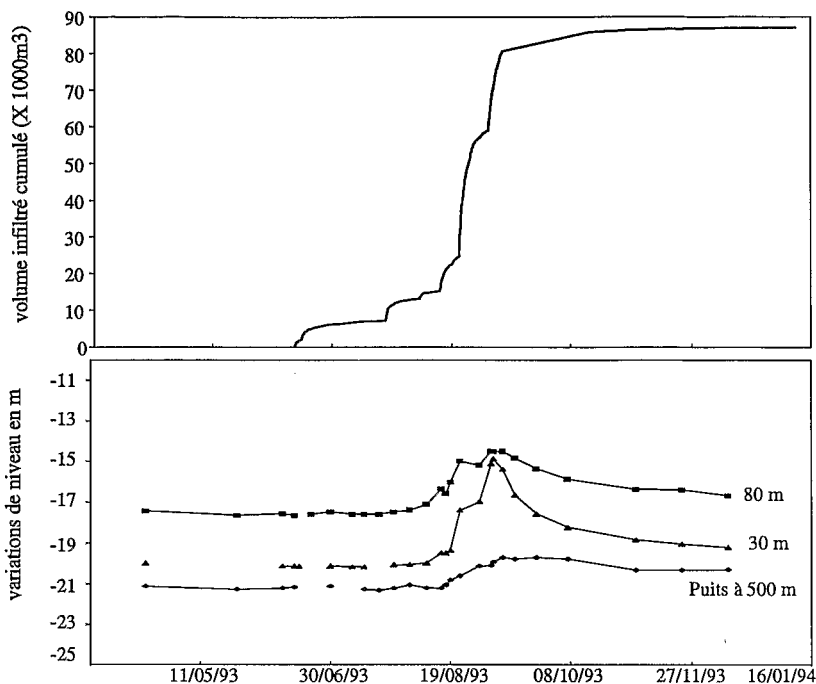


Fig. 7 Evolution des niveaux de la mare de Wankama et des niveaux piézométriques à proximité de la mare (saison 1993).

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. Dispositif de

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

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

- 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.*)
- Seghieri, 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.