

## EXPERIENCE HAPEX-SAHEL CONCEPTS, PROTOCOLES D'EXPERIENCE ET MODELISATION

T. LABEL

### 1. HAPEX-SAHEL : UNE ETAPE VERS UNE HYDROLOGIE DE GRANDE ECHELLE

Les grands projets d'aménagement hydrologique concernant des régions de plusieurs dizaines voire centaines de milliers de km<sup>2</sup>, ainsi que les préoccupations croissantes envers les évolutions climatiques, ont progressivement fait prendre conscience aux scientifiques impliqués dans ce type de recherches, de la nécessité de mieux appréhender le cycle de l'eau aux échelles régionales et continentales (voir sur ce point Eagleson, 1986). Le premier pas significatif dans cette direction a été la conception de Modèles de Circulation Générale (MCG) à la fin des années soixante dix (e.g. Gates, 1983). Au sein de ces modèles, développés par les atmosphériciens et les océanographes, la paramétrisation hydrologique a tout d'abord été très sommaire : la surface du sol sur les continents, qui constitue la condition à la limite inférieure des MCG, étant décrite comme soit totalement sèche, soit saturée. Les études ultérieures de sensibilité de ces modèles ont montré l'importance d'une bonne description de l'interface continent-atmosphère, ce qui signifie, entre autres, une meilleure approche des processus de surface (ce que les anglophones appellent "land-surface processes"). Ceci passe à la fois par une paramétrisation améliorée des processus hydrologiques dans les MCG et par une compréhension plus fine de ceux d'entre eux qui sont fondamentaux à cette échelle.

Plus que partout ailleurs, c'est dans la zone intertropicale que s'imposent des expériences dont le but serait d'aider à cette double tâche. D'une part, ce sont sous ces latitudes que les résultats des MCG sont les moins bons, comme on peut le constater sur la figure 1 extraite de Mitchell (1983). D'autre part, les observations disponibles y sont peu nombreuses, alors même qu'il est assez aisé d'y trouver de grandes surfaces relativement homogènes et peu perturbées par l'action anthropique, donc propices à une instrumentation intensive des différents niveaux de l'interface continent - atmosphère. Un autre aspect important du point de vue des hydrologues est la possibilité offerte, à travers une collaboration avec les chercheurs des disciplines voisines (atmosphériciens, bioclimatologues, pédologues, écologues, ...), de reconsidérer notre approche des question expérimentales. En effet, si analyse et expérimentation peuvent être considérées comme les deux mamelles du progrès scientifique, nul doute que la deuxième se soit beaucoup tarie en hydrologie depuis quelques temps, sans que la première puisse prétendre fournir tous les éléments nutritifs nécessaires pour faire face à de nouveaux besoins. HAPEX-SAHEL constitue le premier prototype de telles expériences, visant à une approche conjointe des problèmes d'expérimentation et de modélisation.

## 2. EXPERIENCE ET MODELISATION : UNE DEMARCHE INTERACTIVE

### 2.1 Objectifs de l'expérience

L'objectif principal de la composante hydrologique de l'expérience HAPEX-SAHEL est l'estimation des quantités d'eau stockées dans les différentes unités du système hydrologique en fin de saison des pluies. C'est une problématique nouvelle qui va au delà des préoccupations principales de l'hydrologie traditionnelle qui se focalisait jusqu'à présent sur l'étude du ruissellement de surface.

Bien que dans son intitulé HAPEX-SAHEL ne reprenne pas le qualificatif de "MOBILHY" (Modélisation du Bilan Hydrique) qui caractérisait la première expérience HAPEX, l'hydrologie reste une composante essentielle de ce type d'opération. C'est ainsi que, en préalable de la Période d'Observation Intensive qui devrait débuter en septembre 1992 et se concentrer sur trois "super-sites" (fig. 2), il est prévu une campagne de mesures météorologiques et hydrologiques s'étendant sur les années 1991 à 1992, avec un premier suivi des précipitations et du ruissellement dès 1990. Cette période de surveillance est plus particulièrement destinée à améliorer nos connaissances sur le milieu physique et sur certains processus qui sont très variables dans le temps. Du fait que la nature de l'excitation du système hydrologique par les précipitations dépend fortement de leur chronologie et de leur importance, on ne peut prétendre l'appréhender correctement à l'aide d'une seule année de mesures. Par ailleurs certaines hypothèses de fonctionnement du milieu, déterminantes pour la modélisation, demandent à être confirmées, ce qui nécessite une expérimentation menée spécifiquement dans ce but.

### 2.2 Autre problématique : autre méthode

Suite aux nombreuses études de ruissellement menées au Sahel, l'ORSTOM a acquis des connaissances sur les mécanismes élémentaires de production des écoulements superficiels et d'infiltration ( voir entre autres, Rodier, 1975, Chevallier et al., 1985, Casenave et Valentin, 1989). Les premières tentatives de modélisation à l'échelle du bassin de quelques dizaines de km<sup>2</sup>, menées notamment par Girard (1975), se sont révélées en partie décevantes. On ne disposait en effet à l'époque ni de la vision d'ensemble permettant de traiter le problème dans sa globalité, ni des moyens d'instrumentation qui auraient permis de quantifier les différents termes du bilan. Les études menées par la suite en milieu sahélien n'ont été que la répétition d'un schéma identique : instrumentation, mesures, accumulation de données, traitement et, éventuellement, modélisation. Cette approche, tout en permettant de diversifier les conditions d'observation et donc d'améliorer nos capacités à décrire, n'a pas débouché sur la mise au point de modèles adaptés au calcul des bilans des différentes aires de stockage.

D'une manière générale, qu'elle s'attache à des bassins de réseau ou expérimentaux, la modélisation hydrologique est rarement précédée d'un schéma d'instrumentation conçu en fonction de cette modélisation. On mesure donc la pluie en certains points du bassin et le débit à l'exutoire et on cherche, le plus souvent à l'aide d'un calage numérique aveugle, à ajuster la série des débits calculés par un modèle à la série des débits observés. Il est rare que le modèle ait été conçu en fonction des objectifs spécifiques de la modélisation, et le calage numérique n'est qu'une technique pour forcer le modèle à adapter ses paramètres aux séries observées, sans aucun égard pour la réalité physique. Dans de telles circonstances, il est impossible de faire la part, dans les erreurs de sortie, entre les erreurs de mesure, les défauts de structure du modèle et la mauvaise identification de ses paramètres. Cette démarche peut se justifier en hydrologie opérationnelle et tant qu'on ne cherche pas à transposer le modèle. Elle s'apparente alors à une analyse en corrélation un peu sophistiquée, où le modèle linéaire est remplacé par un modèle non linéaire plus ou moins conceptuel.

A l'inverse, elle ne peut donner aucun résultat tangible dès lors que l'on s'intéresse à la transposabilité du modèle (ce qui reste le principal problème justifiant l'existence de l'hydrologie traditionnelle comme le rappelle Klemes, 1986), où à tester certains schémas de paramétrisation découlant d'une analyse a priori du fonctionnement du milieu. Dans ce dernier cas notamment, l'expérience et la modélisation doivent procéder d'une démarche interactive, chaque nouvelle expérience étant conçue pour valider ou invalider certaines hypothèses dont on pense qu'elles permettraient d'améliorer la modélisation. Notre manque d'habitude à aborder les problèmes sous cet angle nous laisse dépourvus d'une formulation claire de telles hypothèses, surtout pour le milieu sahélien où peu d'équipes ont travaillé et jamais sur de telles bases. Ceci ne signifie pas que les travaux passés soient non pertinents (voir par exemple ceux concernant le lac de Bam, Pouyaud, 1986) pour la problématique de HAPEX-SAHEL, mais que leurs résultats doivent être réinterprétés à la lueur des objectifs énoncés plus haut. C'est ce à quoi nous nous sommes employés en élaborant un premier schéma d'instrumentation pour la campagne de mesures hydrologiques de 1990 (précipitations, ruissellement, infiltration et recharge des nappes). A chaque étape de la réflexion, qui est loin d'être terminée, la question de déterminer une échelle de mesure cohérente avec la modélisation envisagée ultérieurement s'est posée, sans pour autant que nous ayons pu y répondre toujours de manière satisfaisante. C'est un premier aperçu de ces réflexions qui est donné ici.

### 3. MESURE DES PRECIPITATIONS

Il s'agit de procéder à des mesures qui permettront de tester l'influence, supposée grande, de la répartition spatiale des précipitations sur les modalités du stockage de l'eau dans le sol et en surface. Comme les différentes composantes de la réponse du système ont des temps caractéristiques très variables, la première exigence est d'être capable d'appréhender cette répartition des pluies pour des pas de temps pouvant descendre jusqu'à 15 minutes et sur des surfaces allant de  $1 \times 1 \text{ km}^2$  à  $100 \times 100 \text{ km}^2$ .

De ce que l'on connaît sur l'extrême variabilité spatiale des pluies en milieu sahélien, déjà soulignée par Girard (1975), et confirmée à petite échelle par l'exploitation des données de la campagne EPSAT-NIGER de 1989 (fig. 3), on est amené à admettre qu'un réseau de capteurs ponctuels ne peut fournir à lui seul une estimation précise des quantités d'eau tombées en tout point d'intérêt pour l'hydrologue, aux pas de temps faibles (inférieurs à 30 minutes), sauf à mettre en place un réseau de plusieurs milliers d'appareils.

Parmi les alternatives disponibles, le radar météorologique utilisé en association avec un réseau relativement dense de pluviographes à mémoire statique (1 poste pour  $200 \text{ km}^2$  environ) paraît la plus crédible, même si l'assimilation de données sol et radar est loin d'être une technique totalement maîtrisée. Pour pouvoir étudier la fiabilité de la mesure radar, et pour caractériser la répartition spatiale des précipitations, on disposera, à compter de 1990, d'un réseau de 83 stations sur le degré carré (soit 85 pluviographes, deux sites étant équipés de deux appareils chacun pour comparer la pluie au sol et la pluie à 1m), et de 10 stations plus à l'ouest, donc un total de 95 appareils (fig. 4).

La géométrie du réseau sol a été établie pour les besoins de l'expérience EPSAT-Niger, de telle sorte qu'on puisse couvrir des résolutions allant de 1 à 100 km. Ceci permet d'étudier aussi bien les questions d'échantillonnage de la pluie ponctuelle mesurée par le pluviographe que la variabilité de la relation Z.R (facteur de réflectivité radar-pluie au sol). Cette variabilité est explicable en partie par la nature différente de l'échantillonnage des deux capteurs et en partie par les erreurs de mesure inhérentes à chacun d'eux. Si on connaît assez bien l'ordre de grandeur des erreurs de mesure du pluviomètre, qui sont fortement liées au vent notamment et relativement systématiques, il n'en est pas de même pour le radar. L'instabilité électronique, les effets d'atténuation (qui dépendent de la structure du système précipitant et sont donc instationnaires) sont des sources d'erreur difficilement maîtrisables et dont l'appréhension nécessite des études spécifiques qui s'étendront donc sur trois années (1990 - 1992).

### 4. REDISTRIBUTION DE L'EAU PRECIPITEE

#### 4.1 Concevoir un modèle cohérent avec les données disponibles

Dans l'étude de la redistribution de l'eau après un événement pluvieux, on peut distinguer a priori trois cinétiques.

Cinétique rapide	Stockage superficiel, écoulements de surface et de sub-surface.
Cinétique lente	Redistribution de l'eau dans le sol et mouvements vers les nappes.
Déstockage	Reprise de l'eau par évaporation sous contrôle de la végétation.

La principale contribution attendue de l'hydrologue concerne la cinétique rapide, mais il n'est pas compétent à lui tout seul pour en traiter tous les aspects. Réciproquement, il ne peut se désintéresser de la cinétique lente et du déstockage, car ils conditionnent l'état du système au commencement d'un nouvel événement pluvieux. La cinétique rapide est conditionnée par une variable de forçage externe (les précipitations), une variable d'état très souvent dominante (l'humidité du sol) et les variables statiques décrivant un milieu physique donné. La schématisation des relations existant entre ces trois groupes de variables est la base du modèle hydrologique, caractérisé notamment par l'échelle à laquelle ces relations sont envisagées. Cette échelle est elle-même fonction de la compréhension déjà acquise sur le fonctionnement du milieu, des possibilités instrumentales et des objectifs assignés au modèle.

En zone tropicale sèche, et plus encore au Sahel, la part respective de l'infiltration, du ruissellement de surface et de l'évaporation dans le bilan hydrologique est très différente de ce qu'elle est en zone tempérée ou en zone équatoriale. L'évaporation excède largement l'infiltration au point que dans les zones de pluviométrie inférieures à 400 mm, il a été avancé que l'infiltration est inexistante. Le réseau de drainage n'est bien marqué que sur de petites portions de versant où la pente est significative. Ces versants se terminent en chanfreins, généralement sableux, où l'eau s'écoule de façon erratique et s'infiltré. Plus à l'aval encore, on va rencontrer soit des bas-fonds endoréiques,

soit des émissaires hydrologiques dont certains ne fonctionnent même pas une fois par saison des pluies, du fait de la forte infiltration sur les chanfreins. Dans les deux cas l'eau ainsi infiltrée est en partie concentrée sur place dans les couches du sol où la végétation pourra l'utiliser ultérieurement, et en partie drainée vers la nappe phréatique, contribuant à la remontée de celle-ci, dont le niveau se rapproche alors de la surface, favorisant également l'évapotranspiration.

A coté de cette "toposéquence" bien illustrée par Courault et al.(1990), un autre élément déterminant du paysage hydrologique est constitué par la brousse tigrée implantée sur les plateaux gréseux. C'est un système très fermé du point de vu hydrologique (présence de nombreuses mares de taille relativement faible), mais les échanges avec les talus d'une part par ruissellement, avec les nappes d'autre part par drainage profond demandent à être précisés. On doit également s'interroger sur les possibilités de reprise directe de l'eau des nappes par la végétation, à partir de nappes perchées ou de la nappe phréatique principale même si le niveau piézométrique se situe parfois 50 mètres sous la surface des plateaux, puisque certains arbres continuent leur activité photosynthétique en pleine saison sèche.

Cette juxtaposition de deux grandes unités de fonctionnement hydrologique (auxquelles on peut en ajouter une troisième, la vallée sèche du Dallol Bosso, qui borde le degré carré à l'est, et qui doit être traitée comme une entité à part), impose de prévoir une instrumentation en conséquence. D'une part, on doit essayer de déterminer les différents termes du bilan sous brousse tigrée, le ruissellement ne jouant qu'un rôle mineur sauf sur les talus. D'autre part, il faut déterminer, sur les zones de versant, le rôle du ruissellement dans la redistribution de l'eau, sachant qu'une faible part s'écoule en dehors des bassins de taille moyenne et rien (sauf débordements exceptionnels) en dehors des mares de bas-fonds. Bien entendu il faudra, pour la modélisation être capable de relier zones de brousse tigrée et de versants, ce qui pose deux problèmes. Le premier est celui du fonctionnement : i) rôle de la texture et de la profondeur des sols, et de la pente dans la formation des écoulements au contact plateaux / versants; ii) peut-il y avoir alimentation de ces écoulements de versant par mise en charge de nappes perchées à partir des infiltrations sur le plateau ? Le second problème est celui de l'évaluation (ou de la modélisation) des zones de drainage externe des plateaux, lors de l'extension à des zones non instrumentées. D'une manière générale, le défi à résoudre est de passer d'une instrumentation sur des zones échantillons à une modélisation d'ensemble sur des surfaces beaucoup plus grandes qui ne pourront pas être décrites comme la juxtaposition d'aires élémentaires, répertoriées et classifiées selon les critères déterminés à partir des zones échantillons.

En effet, il est impensable, dans l'état actuel des moyens de mesure, de fournir une image suffisamment fidèle (moyenne échelle) et précise (petite échelle) de l'ensemble du milieu (pédologie, végétation, géologie, topographie, caractérisation hydrodynamique des sols, ...) que nécessiterait la mise en oeuvre d'un modèle spatialisé classique. Cela est techniquement réalisable en simplifiant à l'extrême la partition du paysage, mais alors la validité des modèles élémentaires, calés sur les zones étudiées en détail, risque d'être remise en cause. Ainsi, à supposer que le modèle de base repose sur l'estimation précise de paramètres locaux, tels que la profondeur du sol, ses caractéristiques hydrodynamiques et la topographie de petite échelle, lorsqu'on l'applique sur des zones où ces différents paramètres ne peuvent être évalués que très grossièrement (des erreurs de 100 % ne sont pas à exclure), il deviendra illusoire de l'utiliser sans calage sur des séries observées. Les incertitudes sur les paramètres déduits des cartes ou de quelques observations ponctuelles, conduisent à des situations de compensation très forte entre ces paramètres, et donc à une multiplicité des solutions possibles que seule une optimisation numérique aveugle est à même de discriminer.

Même à supposer que l'on soit capable d'équiper chaque émissaire hydrologique drainant plus de 100 km<sup>2</sup> et chaque mare de bas-fonds, les imprécisions sur la mesure des débits et des fluctuations des volumes stockés seraient telles, que l'optimum numérique ne serait qu'un compromis sans signification physique. Dans l'incapacité où on se trouve alors d'expliquer cet optimum par l'influence respective des erreurs de mesure, des erreurs de spécification des paramètres et des erreurs de formulation du modèle lui-même, toute amélioration ultérieure de ses performances, basée sur d'autres expériences, devient un jeu de hasard.

Il n'existe, bien entendu pas de solutions simples à ces difficultés qui, au demeurant, se rencontrent fréquemment en hydrologie. On peut au mieux essayer de conserver une certaine cohérence entre la structure du modèle mis en oeuvre, la nature des données que l'on pense pouvoir recueillir et nos connaissances sur les mécanismes, quand elles existent.

#### 4.2 Le cas de la brousse tigrée.

La brousse tigrée est un milieu caractérisé par son manque de relief en grand, l'homogénéité relative de sa végétation, et un sol de faible épaisseur (20 à 80 cm) recouvrant des cuirasses latéritiques. La végétation s'y présente en bandes, ou arcs, plus ou moins continues, qui lui confère, vu d'en haut, l'aspect d'une peau de tigre, d'où son nom.

En l'absence de réseau hydrographique, la cinétique rapide se limite ici, après remplissage des dépressions superficielles qui jouent probablement un grand rôle, à une alimentation de nombreuses mares de taille assez faible et des talus qui font communiquer les plateaux avec les bas-fonds (fig. 5).

Trois échelles de travail sont à considérer pour étudier les flux hydriques sous brousse tigrée : l'arbre; l'arc de végétation; l'ensemble du plateau physiquement bien délimité par les talus qui l'entourent.

Introduire l'arbre en tant que tel dans le modèle hydrologique est exclu. On retomberait dans les ornières de l'intégration d'éléments disparates dont on ne connaît pas les caractéristiques individuelles. Des études sur l'enracinement peuvent néanmoins être intéressantes pour apprécier la possibilité de reprise par évaporation de l'eau des nappes directement à partir des arbres du plateau, information utile dans la modélisation du déstockage.

On peut alternativement s'intéresser à la dynamique de l'eau circulant entre arcs de végétation et plages dénudées. Les observations de terrain amènent à constater que l'eau s'accumule au niveau des arcs, alors qu'entre les arcs elle doit s'évacuer soit par drainage interne, soit par écoulement vers des zones de concentration : les arcs eux-mêmes ou de petites mares repérables par photographie aérienne. Ces mouvements de surface et sub-surface dépendent de la micro topographie locale, de la texture et de la structure des sols, tous paramètres qu'il semble vain de vouloir cartographier sur de grandes étendues. A supposer donc que l'on soit capable de modéliser le fonctionnement d'un arc, on se heurterait pour l'extension spatiale aux difficultés de représentation de l'agencement des arcs, doublé d'une grande incertitude sur les lames d'eau précipitées à cette échelle et l'humidité des horizons superficiels des sols.

La solution restante est donc de raisonner directement à l'échelle d'un ensemble homogène de brousse tigrée. A cette échelle, on ne peut transposer les modèles qui auraient été validés expérimentalement au niveau de la parcelle, puisque leurs paramètres n'ont plus aucun sens et que d'autres mécanismes, absents à petite échelle, interviennent. Une modélisation globale, faisant abstraction des connaissances que nous possédons sur la répartition spatiale des pluies et que nous pouvons acquérir sur celle de l'humidité du sol, ne constitue pas non plus une alternative pertinente puisque l'on sait que ce type de modèle est difficilement transposable à d'autres domaines que ceux sur lesquels ils ont été calés.

La nature du modèle à mettre en oeuvre doit être adaptée à la nature des données dont nous pouvons disposer. Ces données se présentent essentiellement sous une forme stochastique. Les premiers traitements effectués sur les données de la saison des pluies 1989 ont montré que, pour les lignes de grain, le réseau de pluviographes fournissait à lui seul une bonne estimation du champ des lames d'eau moyennes précipitées sur des surfaces de 5x5 km<sup>2</sup>, et pour des pas de temps dépassant 30 minutes (Thauvin and Lebel, 1989). L'estimation simultanée de la covariance spatiale du processus aléatoire débouche par ailleurs sur la possibilité de simuler des champs de précipitations sur les zones moins bien instrumentées. Enfin, l'apport du radar, et le renforcement local de la densité des pluviographes, permettent d'envisager de réduire la surface minimale d'estimation à une taille de 1x1 km<sup>2</sup> et le pas de temps à 15 minutes. A condition d'obtenir des renseignements du même ordre sur l'humidité des sols, une modélisation stochastique du ruissellement de surface est envisageable, moyennant certaines études de fonctionnement à cette échelle et une description appropriée du milieu.

Pour valider un tel modèle, on procéderait également par échantillonnage, en suivant l'évolution du niveau de l'eau dans un certain nombre de mares réparties sur l'ensemble. La densité de la végétation, la nature et l'épaisseur des sols, les surfaces drainées vers les mares et vers l'extérieur, la topographie d'ensemble y seraient cartographiées précisément. On chercherait également une méthode permettant de caractériser la micro topographie, après avoir vérifié son importance présumé dans le stockage de l'eau in situ.

Dans cette étape de mise au point du modèle, on décrirait donc "exactement" le milieu physique de petite échelle d'une part et stochastiquement celui de micro échelle, ainsi que les données de précipitations et d'humidité des sols d'autre part. Le protocole de mesure à mettre au point, sur cette surface échantillon, peut donc se résumer de la manière suivante :

a) mesure des précipitations : renforcement locale de la densité du réseau de pluviographes afin de disposer de 5 postes au moins sur la surface elle-même.

b) suivi de l'humidité des sols : développement d'une méthode permettant d'échantillonner les fluctuations d'humidité des horizons recouvrant la cuirasse. Caractérisation des covariances spatiales. Mise sur pied d'un site expérimental pour étudier les échanges verticaux entre ces horizons et la cuirasse sous-jacente. Recherches sur les transferts horizontaux entre plages dénudées et arcs de végétation. Aucun dispositif de mesure connu ne semble pouvoir donner totalement satisfaction pour mener à bien ces différentes études. La cuirasse présente des discontinuités et se prête de toutes façons mal à l'implantation de tubes de sondes à neutrons. Les sondes TDR ne fournissent des indications que sur les 20 premiers centimètres de sol. Ce point nécessite donc une attention particulière.

c) description du milieu : cartographie de la profondeur des sols et de leur capacité d'infiltration. Quantification de la densité du couvert végétal. Etude du relief d'ensemble (pendage général). Caractérisation de la micro topographie.

d) limnimétrie : inventaire des mares et des surfaces drainées. Suivi du niveau des mares échantillons à l'aide de limnigraphes à mémoire statique, et supervision d'ensemble par photographies prises à partir d'un ULM. Etude des zones d'alimentation des talus.

La zone de brousse tigrée située à l'est du bassin de Sama Dey se prêterait bien à ce travail. Elle a grossièrement la forme d'un carré de  $7,5 \times 7,5 \text{ km}^2$ .

Parallèlement à ces études concernant la redistribution de l'eau à la surface et dans le sol, un suivi géochimique et isotopique de ces mares serait une contribution utile à l'étude du déstockage en permettant de séparer les variations de niveau dues à l'évaporation de celles dues à un drainage profond vers les nappes.

#### 4.3 Que faut-il mesurer sur les zones de versants et de bas-fonds ?

Il ne s'agit pas de sélectionner un ou deux bassins "représentatifs", qui seraient avant tout représentatifs d'eux-mêmes. Le suivi d'un bassin lors d'une campagne préliminaire (1990 si possible) est néanmoins nécessaire, ne serait-ce que pour tester des dispositifs de mesure (écoulements sur des versants, mesures d'écoulement dans les griffes des chanfreins et, en aval, dans les émissaires drainant l'ensemble d'un bassin). Le bassin de Sama Dey ( $22 \text{ km}^2$ ) a été choisi pour jouer ce rôle. D'une part, il est localisé de telle manière qu'il appartiendrait au super-site central (fig. 2) sélectionné par les équipes chargées de mesurer les flux, et la couverture pluviographique y est potentiellement excellente puisqu'il suffirait de décaler d'une maille la cible du réseau EPSAT-NIGER (fig. 4) pour qu'elle couvre ce bassin. La précision sur l'estimation des lames d'eau moyennes sera donc comparable à celle obtenue sur la surface échantillon de brousse tigrée. D'autre part, on y trouve l'ensemble des états de surface caractéristiques de la région : brousse tigrée sur cuirasse, cultures et jachères sur bas-fond sableux et sur chanfreins sablo-argileux. Enfin, il alimente directement le kori de Dantiandou qui est l'émissaire hydrologique principal de cette région centrale, connecté à l'aval au Dallol Bosso, vallée sèche où les nappes sont affleurantes en saison des pluies.

L'étude d'un tel bassin requiert l'installation de trois stations de mesure de débits au moins : une sur l'entaille principale drainant les chanfreins du versant Est, une contrôlant l'ensemble du bassin et une plus en amont sur l'émissaire principal. Un dispositif de mesure sur le Kori de Dantiandou à l'amont et à l'aval de la confluence avec le bassin de Sama Dey est également à envisager mais sera difficile à réaliser au vu du lit peu marqué du cours d'eau.

Les débits ainsi mesurés doivent plus être conçus comme un moyen de valider des hypothèses de fonctionnement et leur représentation dans un modèle, que comme une série numérique à reconstituer au mieux. Ce n'est pas la quantité d'eau écoulé en tant que telle qui importe réellement, mais ce qu'elle nous révèle sur les mécanismes de redistribution de l'eau en amont. Cette redistribution doit être étudiée en parallèle et nécessite une instrumentation spécifique, notamment concernant l'humidité des sols : piézographe (s) pour détecter des mises en charge là où elles sont le plus susceptibles de se produire et transects transversaux et longitudinaux de stations neutroniques et tensiométriques.

#### 4.4 Modélisation d'ensemble.

Dans la phase d'extension du modèle à des zones plus vastes où il serait impossible d'obtenir une description "exacte" du milieu, on opérerait à nouveau par échantillonnage afin d'identifier la distribution statistique des éléments de paysage de moyenne échelle. Les relations éventuelles entre ces éléments de paysage et la manière dont fluctue l'humidité des sols, seront également à prendre en compte et nécessiteront une étude spécifique.

## 5. HYDROGEOLOGIE

Au Sahel, le rôle joué par les nappes dans le contrôle de l'évapotranspiration est déterminant. La fluctuation de leur niveau conditionne la formation des mares de bas-fond et leur drainage, que ce soit dans les nombreuses cuvettes endoréiques ou dans les vallées sèches.

Trois études hydrogéologiques sont en cours, concernant chacune un des grands ensembles du degré carré. Pour le compte de la Direction des Ressources en Eau (DRE) du ministère de l'hydraulique du Niger, P. Schroeter a monté une station expérimentale à Banizoumbou (fig. 7), dans une région présentant une dépression piézométrique (Schroeter, 1989). Deux puits ont été forés. Le premier a une profondeur de 57 mètres, il concerne la nappe phréatique supérieure, dont le niveau local est de - 20 m. Le second a été foré jusqu'au socle à -130 m. Il est crépiné à -108 m, dans la nappe artésienne inférieure, dont le niveau de jaillissement est de + 10 m. Trois piézomètres dans la nappe d'eau libre et un dans la nappe captive sont également installés. Le forage d'un troisième puits de recherche, profond de 30 m et large de 1,8 m doit démarrer au mois de juin 1990. Des carottages latéraux seront effectués à intervalle régulier dans les parois du forage. Ces travaux s'insèrent dans une étude plus vaste visant à quantifier les processus de recharge sur le degré carré de Niamey. Depuis 1985, 33 puits sont observés mensuellement (Schroeter, 1989) et un nivellement de précision mené conjointement avec le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) est envisagé. Par ailleurs, un suivi permanent à l'aide de piézographes à mémoire statique est prévu sur le transect Banizoumbou - Korbo - Tigo Zemo (fig. 7).

L'instrumentation d'autres puits en liaison avec les mesures hydrologiques effectuées sur le bassin de Sama Dey et la zone de brousse tigrée adjacente est à l'étude.

De son côté l'Institut d'Hydrologie (IH) de Wallingford, s'appuyant sur d'autres puits de recherche de la DRE, prévoit de mener ses propres investigations en rive droite du Niger dans la région de Damari-Sadoré (fig. 8). Elles seront basées sur 50 points de surveillance du niveau de la nappe, dont la profondeur maximum est de 60 m. Ce projet devrait être couplé à des études d'hydrologie de surface qu'il semble impossible de démarrer dès cette année, les efforts de l'ORSTOM portant prioritairement sur la zone centrale.

De son côté, le BRGM a entrepris un travail sur le Dallol Bosso, vallée sèche constituant la partie est du degré carré, visant à modéliser les transferts souterrains dans cette zone. La connexion de ce travail avec celui de l'équipe de P. Schroeter est souhaitable pour aboutir à une modélisation d'ensemble du milieu souterrain en rive gauche du Niger, qui pourrait alors être couplée au modèle d'hydrologie de surface. Les modalités de ce couplage restent à déterminer et constituent en eux-mêmes un véritable terrain d'investigation.

## 6. CONCLUSION

Il est fréquent en hydrologie de poser plus de questions qu'on ne peut prétendre en résoudre, et cette présentation rapide des objectifs de la composante hydrologique de HAPEX-SAHEL n'échappe pas à la règle. Il est évident qu'il faut savoir rester modeste face à l'ampleur des travaux à accomplir et que les objectifs de l'expérience ne pourront être atteints qu'en partie, ou, si l'on préfère, avec une précision limitée. On est cependant obligé de recenser l'ensemble des problèmes à traiter pour être complet, quitte à en privilégier quelques uns sur lesquels l'approche spécifique à HAPEX-SAHEL devrait permettre de progresser, à savoir, entre autres :

- \* distribution spatiale des précipitations sahéliennes aux petites échelles de temps et influence sur la réponse hydrologique;
- \* répartition de l'eau en zone de brousse tigrée sur plateau, notamment estimation du bilan des mares;
- \* relations entre les nappes et les mares de bas-fonds;

Par contre, aussi bien en brousse tigrée que sur versants, le problème à la fois le plus ardu à résoudre et le plus important pour le couplage sol - atmosphère est celui de la redistribution de l'eau dans le sol. Ceci justifie l'existence d'un groupe spécialisé sur ce sujet au sein de l'expérience, avec lequel une collaboration étroite est indispensable.

Sur le plan méthodologique, on peut espérer retirer des enseignements fructueux de la comparaison entre un modèle spatialisé classique et un modèle distribué et stochastique. De plus on s'efforcera d'intégrer la vision des spécialistes des autres disciplines (physiciens du sol et de l'interface végétation - atmosphère en particulier), non pas seulement au niveau de la description des phénomènes, mais également à celui de leur modélisation. Ceci implique de réfléchir à un modèle au sein duquel plusieurs échelles seraient emboîtées. Pour atteindre ces objectifs, deux conditions sont impératives : 1) traiter les données rapidement pour corriger d'une campagne sur l'autre les protocoles de mesure et favoriser la confrontation des points de vue; 2) définir un cadre d'échange et de validation de ces données, acquises avec des résolutions spatiales et temporelles fort diverses. Il s'agit là d'un travail méthodologique en soi, dont la difficulté et l'importance ne doivent pas être sous-estimées.

## REFERENCES

Casenave, A., et C. Valentin, Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration, Collec. Didactiques, ORSTOM ed., Paris, 1989.

Chevallier, P., J. Claude, B. Pouyaud, A. Bernard, Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi, Collection travaux et documents N° 190, ORSTOM ed., Paris, 1985.

Courault, D., J.M. D'Herbes, C. Valentin, Le bassin versant de Sama Dey : premières observations pédologiques et phytoécologiques. Programme HAPEX-SAHÉL, Rapport LIA - ORSTOM, Bondy, 1990.

Eagleson, P. S., Global scale hydrology, *Water Resour. Res.*, 22(9), 6S-14S, 1986.

Gates, W.L., The use of general circulation models in the analysis of the ecosystem impacts of climatic change, Report of the Study Conference on Sensitivity of Ecosystems and Society to Climatic Change, World Clim. Impact Stud. Program, World Meteorol. Org., Geneva, 1983.

Girard, G., Application du modèle à discrétisation spatiale au bassin versant de l'oued Ghorfa (Mauritanie), *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. hydrol.*, 12(3), 167-188, 1975

Hoepffner, M., T. Lebel and H. Sauvageot, EPSAT-NIGER a pilot experiment for rainfall estimation over West Africa, WMO/LAHS/ETH Workshop on Precipitation Measurement, Proceedings pp 251-259, St Moritz, 1989.

Klemes, V., Dilettantism in Hydrology, transition or destiny ?, *Water Resour. Res.*, 22(9), 177S-188S, 1986.

Mitchell, J. F. B., The hydrological cycle as simulated by an atmospheric general circulation model, in *Variations in the Global Water Budget*, edited by A. Street-Perrott and M. Beran, pp. 429-446, D. Reidel, Hingham. Mass., 1983.

Pouyaud, B., Contribution à l'évaluation de l'évaporation des nappes d'eau libre en climat tropical sec, exemple du lac de Bam et de la mare d'Oursi (Burkina Faso), du lac Tchad et d'açudes du Nordeste brésilien, Collec. Etudes et Thèses, ORSTOM Ed., Paris, 254 p., 1986.

Rodier, J., Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain, Collec. Travaux et Documents N° 146, ORSTOM Ed., Paris, 121 P., 1975.

Schroeter, P., Programmes de recherches de la Direction des Ressources en Eau dans la région de Niamey, Ministère de l'Hydraulique de la République du Niger, Direction des ressources en eau, 1989.

Thauvin, V., and T. Lebel, EPSAT : study of rainfall over the SAHEL at small time steps using a dense network of recording raingauges. WMO/LAHS/ETH Workshop on Precipitation Measurement, Proceedings pp 260-267, St Moritz, 1989.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : comparaison entre valeurs observées de précipitation et d'évaporation, et valeurs calculées par un Modèle de Circulation Général (d'après Mitchell, 1983).

Figure 2 : La zone d'étude de HAPEX-SAHEL. Elle recouvre un carré mesurant un degré en longitude et un degré en latitude. Un super-site sera de plus installé plus au nord, dans la région de Ouallam, pour étudier l'influence du gradient pluviométrique.

Figure 3 :

Figure 4 : le réseau de pluviographes à mémoire statique.

Figure 5 : schéma d'une zone de brousse tigrée.

Figure 6 : bloc diagramme du bassin versant de Sama Dey (d'après Courault et al., 1990).

Figure 7 : transect Banizoumbou- Korto- Tigo Zéno, le bassin de Sama Dey et la zone échantillon de brousse tigrée (repris d'après une carte de P. Schroeter, 1989).

Figure 8 : la région de DAMARI- SADORE (d'après P. Schroeter, 1989).

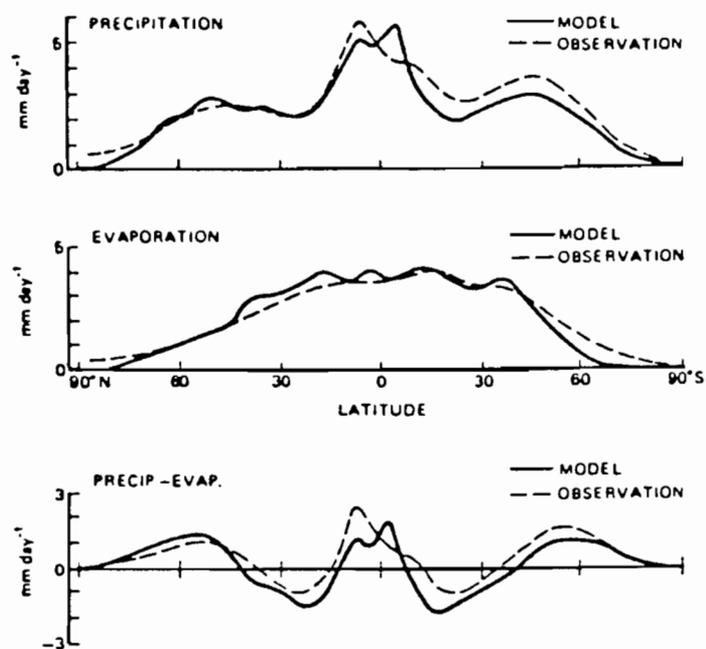


Figure 1 : comparaison entre valeurs observées de précipitation et d'évaporation, et valeurs calculées par un Modèle de Circulation Générale (d'après Mitchell, 1983).

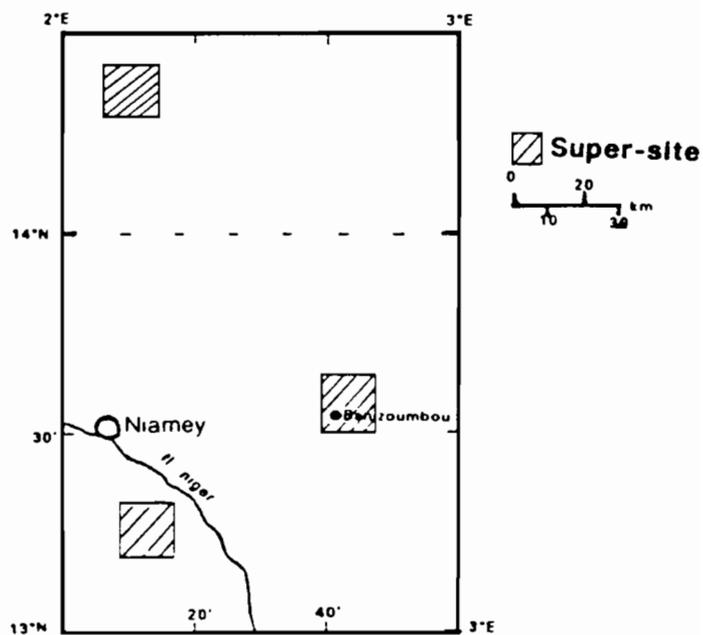


Figure 2 : La zone d'étude de HAPEX-SAHEL. Elle recouvre un carré mesurant un degré en longitude et un degré en latitude. Un super-site sera de plus installé plus au nord, dans la région de Ouallam, pour étudier l'influence du gradient pluviométrique.

EP5AT NIGER NETWORK (34 GAUGES) - CUMULATIVE RAINFALL (MM)

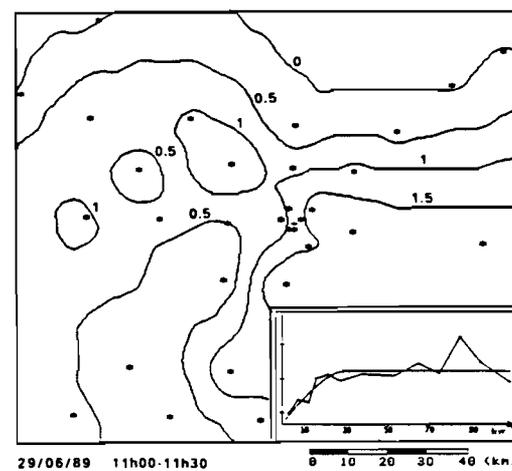
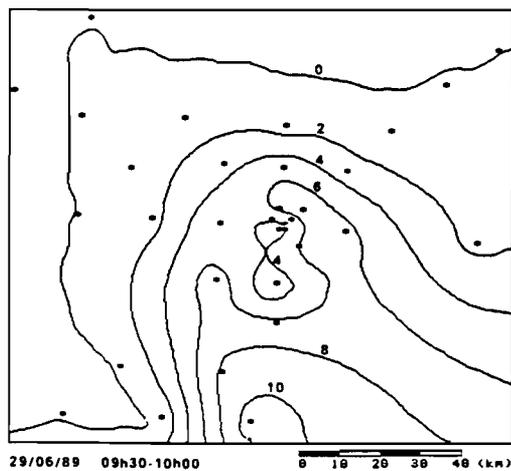
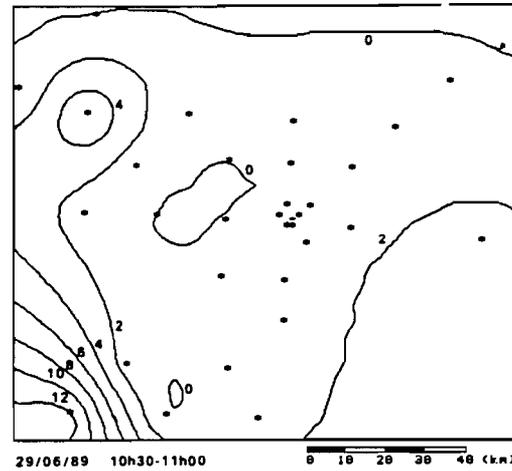
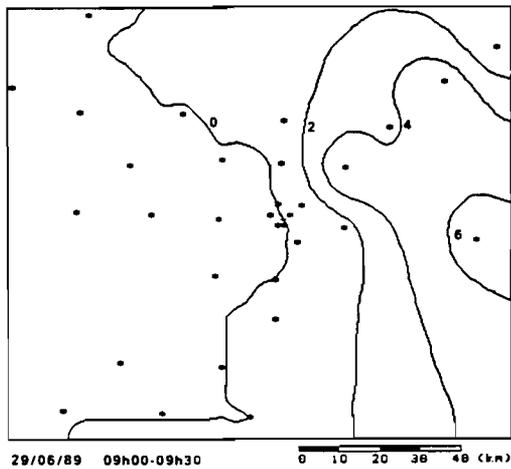
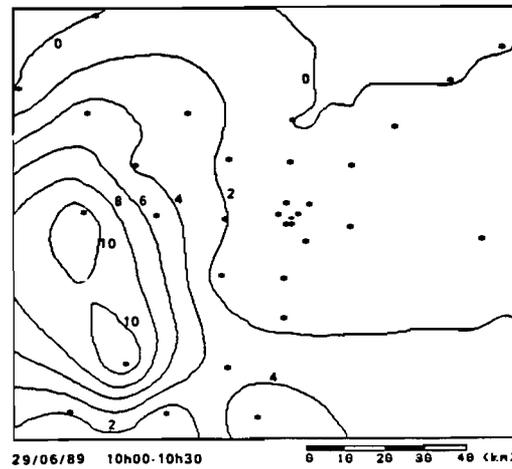
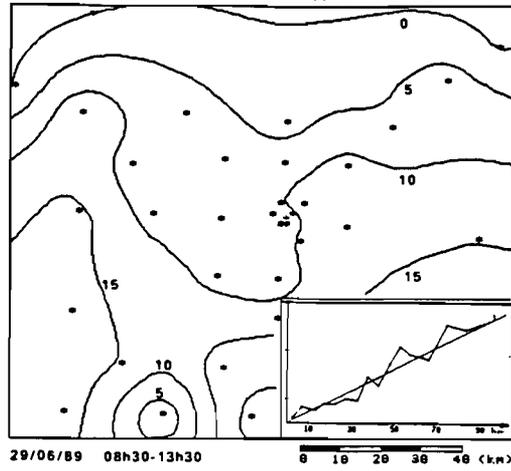


Figure 3 : Isohyètes d'une ligne de grains (29 juin 1989). En haut et à gauche : cumul sur l'évènement.  $b_1$  à  $b_5$  : cumuls sur une demi-heure au passage de la partie convective.

# DEGRE CARRE DE NIAMEY

## EMPLACEMENT DES STATIONS DURANT L'HIVERNAGE 1990

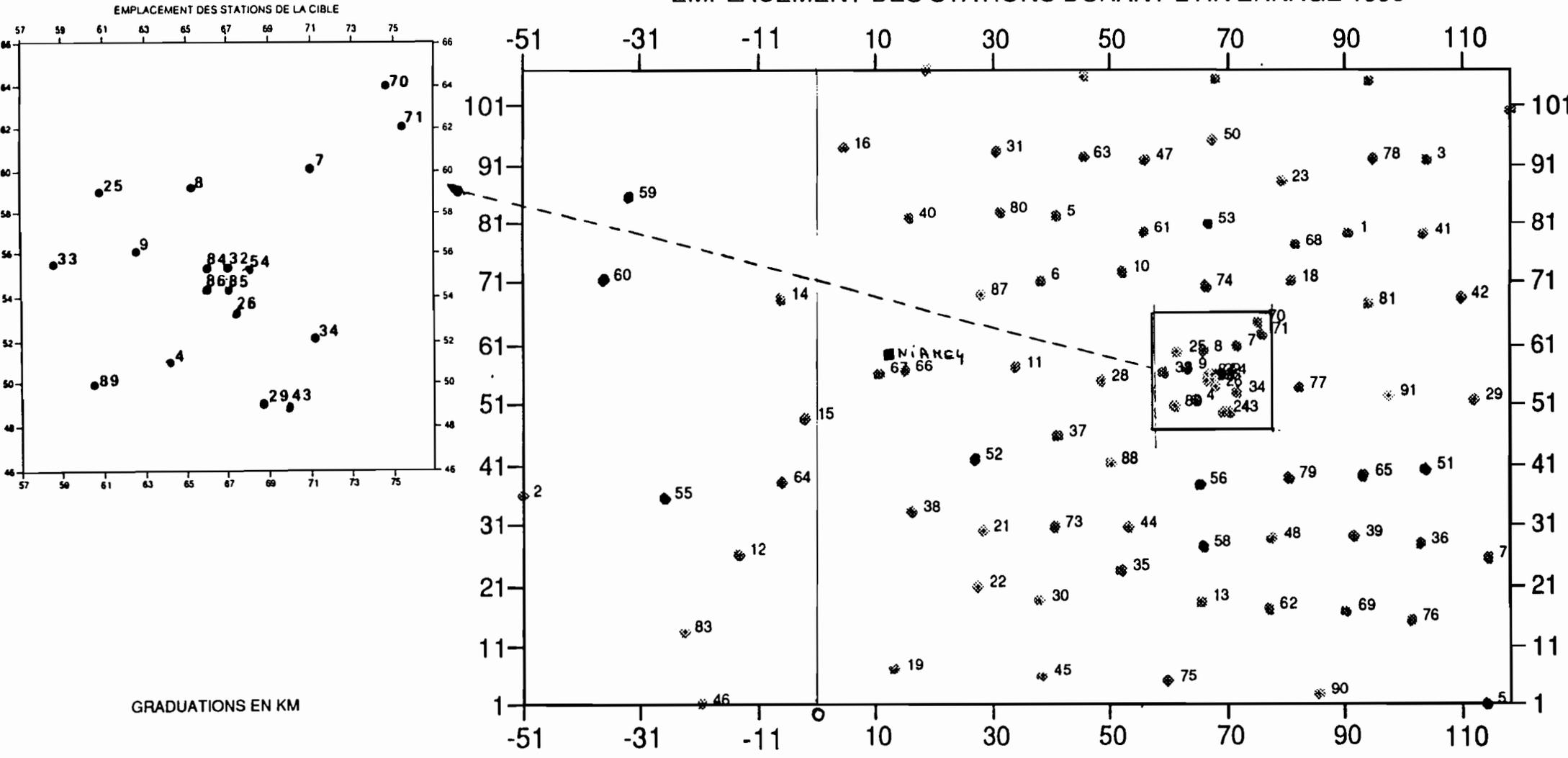


Figure 4 : le réseau de pluviographes à mémoire statique.

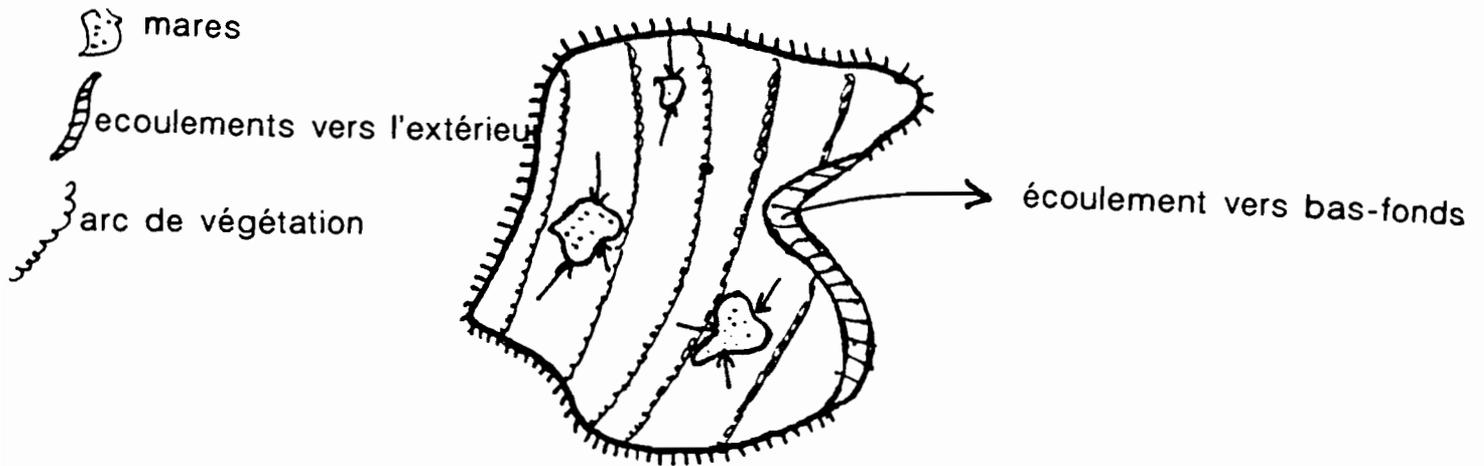


Figure 5 : schéma d'une zone de brousse tigrée.

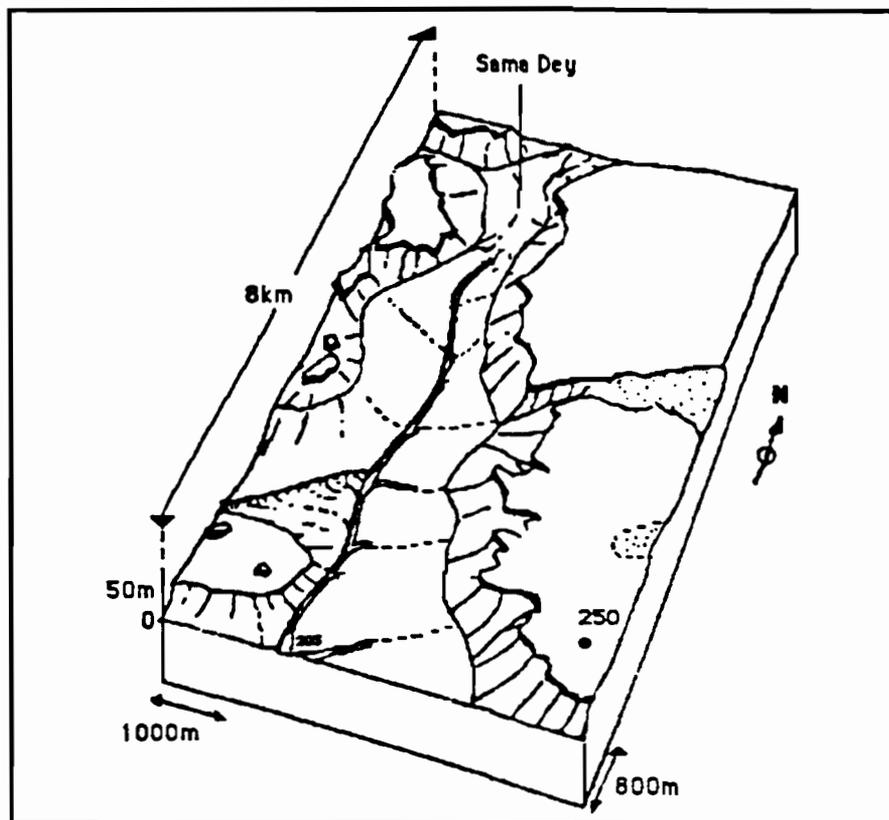
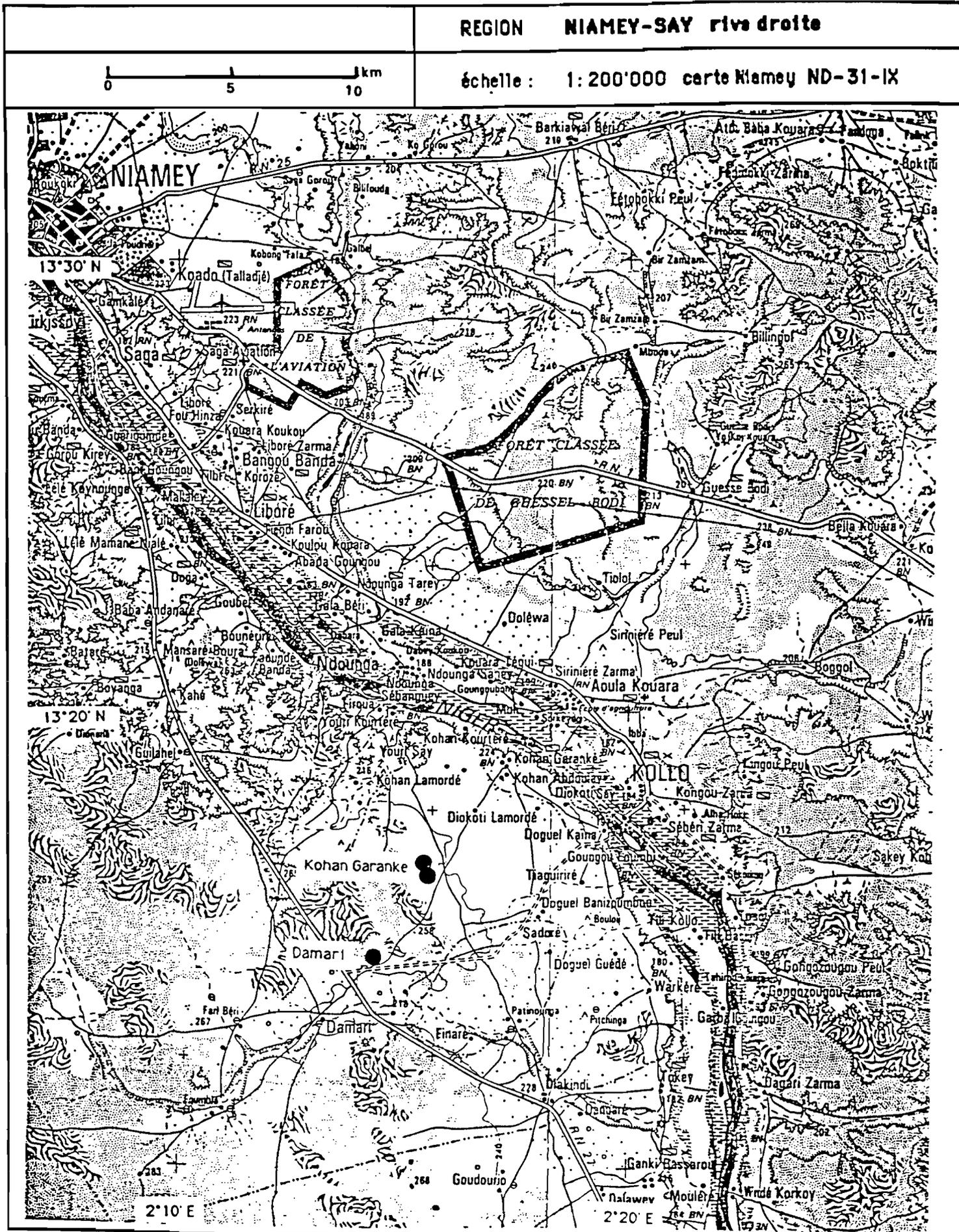


Figure 6 : bloc diagramme du bassin versant de Sama Dey (d'après Courault et al., 1990).





Kohan Garanke : 1 piézomètre, nappe libre ; 1 piézomètre altérites du socle

Damari : 1 piézomètre, nappe libre

Figure 8 : la région de DAMARI- SADORE (d'après P. Schroeter, 1989).