

H COMME HAPEX : HYDROLOGIE HORS BASSIN VERSANT

LEBEL T.

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 km², 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 questions 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. PLUSIEURS DISCIPLINES ET PLUSIEURS ECHELLES

2.1 Objectifs de l'expérience

Aboutir à une évaluation plus fine du bilan hydrologique et à une meilleure représentation des états de surface dans les MCG constitue un des principaux buts de l'expérience. La composante hydrologique vise à estimer les quantités d'eau stockées dans les différentes unités du système hydrologique en fin de saison des pluies. Les études sur les états de surface concernent aussi bien leur caractérisation (albedo, classification du couvert végétal, répartition des grandes unités, ...) que le fonctionnement de l'interface sol-végétation. Cette interface conditionne les échanges continent-atmosphère, c'est à dire essentiellement les flux de H₂O, CO₂ et chaleur, qui sont en étroite interaction. Il est, par exemple, bien connu que le cycle évaporation-condensation de l'eau atmosphérique est à la fois un moteur essentiel de la circulation générale, et une source majeure de transfert d'énergie des régions tropicales, au bilan radiatif excédentaire, vers les régions tempérées ou polaires dont le bilan radiatif est déficitaire. Pareillement, les flux de vapeur d'eau et de gaz carbonique, contrôlés par la végétation, dépendent d'un équilibre énergétique qui est lui même influencé par la dynamique de la végétation.

2.2 Une véritable pluridisciplinarité

Le projet HAPEX-SAHEL ne peut exister que grâce à la collaboration entre plusieurs disciplines. Atmosphériciens, hydrologues, physiciens du sol et de l'interface végétation-atmosphère, pédologues, géologues, écologues, climatologues sont les principaux intervenants. HAPEX-SAHEL démarre dès cette année par une pré-campagne, associant hydrologues, physiciens du sol, pédologues, géologues, écologues, et bioclimatologues, destinée à améliorer nos connaissances sur le milieu physique et sur certains processus qui sont très variables dans le temps, notamment l'excitation du système hydrologique par les précipitations. Deux campagnes lui succéderont en 1991 et 1992, qui couvriront l'ensemble des phénomènes hydrologiques et météorologiques durant toute la saison des pluies. Puis viendra la Période d'Observation Intensive

(POI) qui débutera en septembre 1992 et se concentrera sur deux "super-sites" (fig. 2). Un troisième super-site potentiel est localisé en dehors du degré carré de référence, afin de tester les effets du gradient latitudinal de précipitation sur les processus étudiés

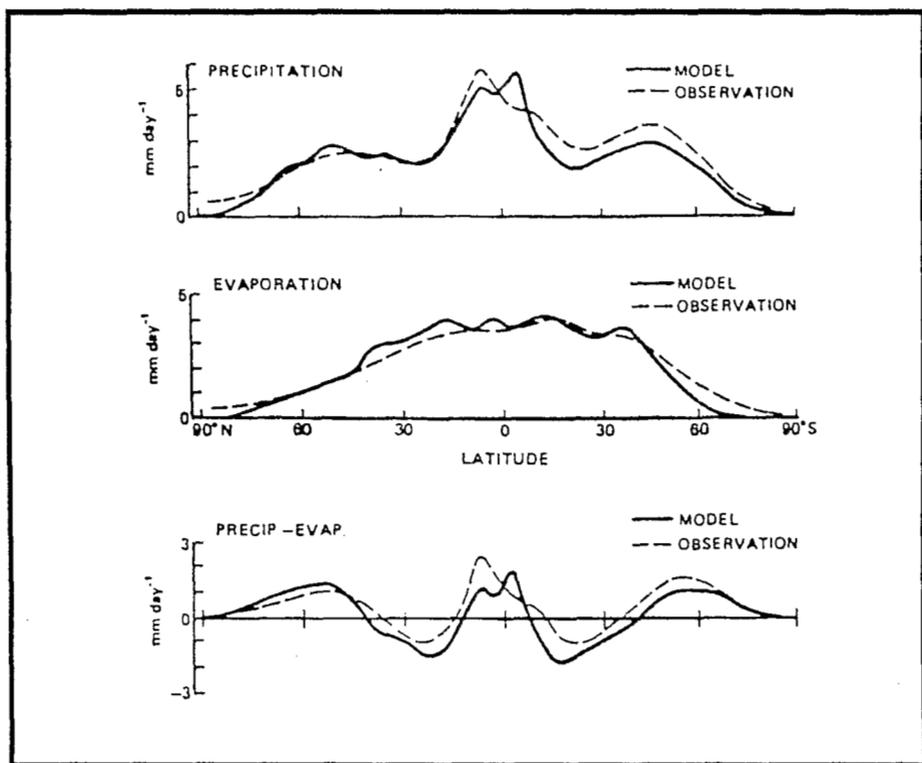


Figure 1 . Comparaison entre valeurs observées de précipitation et d'évaporation, et valeurs calculées par un Modèle de Circulation Général (d'après Mitchell, 1983)

2.3 Du km² à l'ensemble du Sahel

Certains de ces processus seront analysés à petite échelle (de 1x1 km² à 10x10 km²), et devront par la suite être intégrés sur l'ensemble du degré carré (100x100 km²) qui constitue la surface de référence de l'expérience (13°-14° N; 2°-3° E). L'extension des résultats à l'ensemble de la zone sahélienne reposera, elle, sur un suivi par satellite, et une forte composante télédétection a été en conséquence incluse pour étudier le passage de la vérité terrain sur la surface de référence (100x100 km²) à l'image satellitaire. Il s'agit là aussi d'une question d'échelle: résolutions différentes d'un coté et intégration sur de surfaces non instrumentées de l'autre. Ces questions vont être illustrées dans ce qui va suivre par quelques réflexions sur la modélisation hydrologique que l'on envisage de mettre en oeuvre.

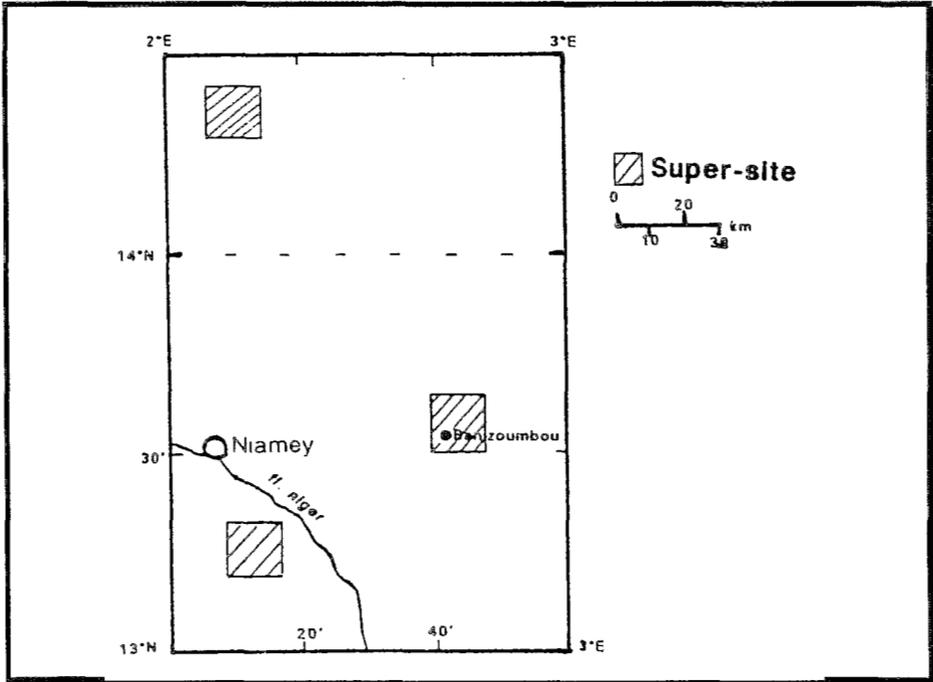


Figure 2. La zone d'étude de HAPEX-SAHEL. Elle recouvre un carré mesurant un degré en longitude et un degré en latitude. Un super-site sera de plus installé plus au nord, dans la région de Ouallam, pour étudier l'influence du gradient pluviométrique

3. CONSTANTES DE TEMPS ET RESOLUTION SPATIALE

3.1 Les précipitations

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 $100 \times 100 \text{ km}^2$.

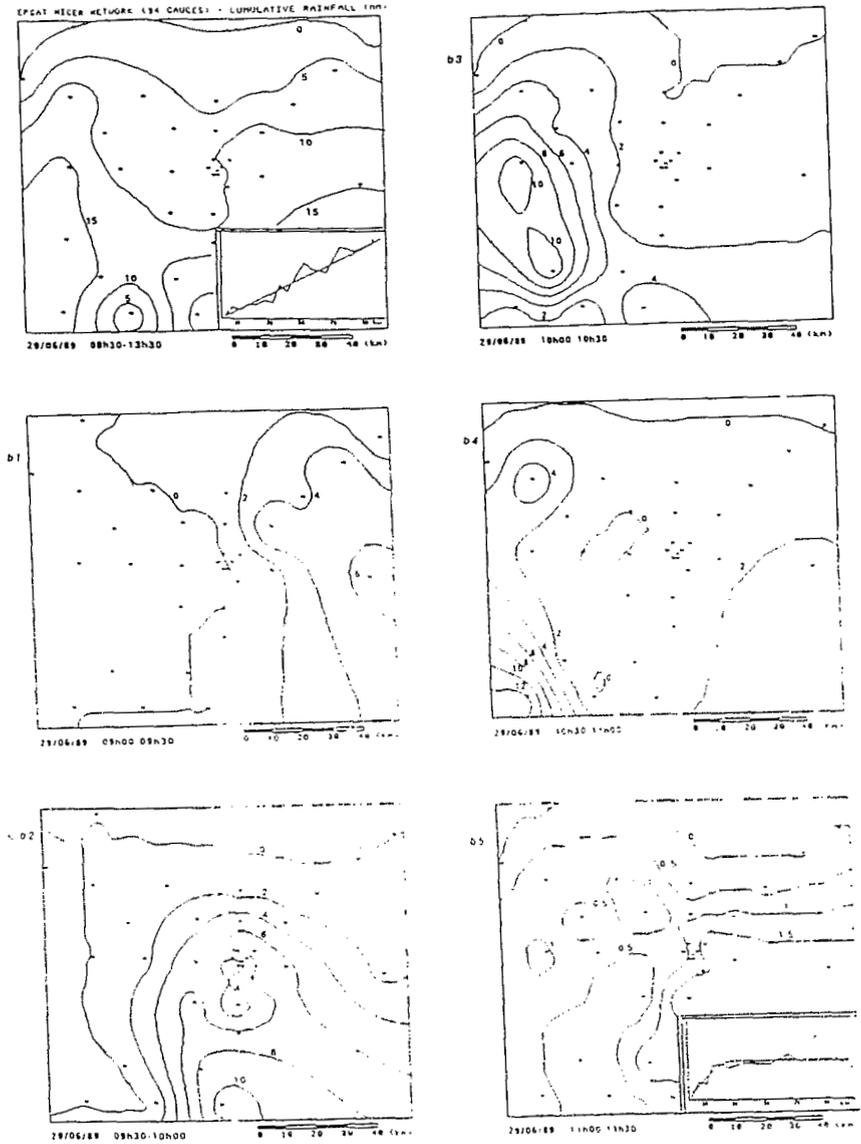


Figure 3. Isohyètes d'une ligne de grains (29 juin 1989). En haut à gauche : cumul sur l'évènement. b₁ à b₅ : cumuls sur une demi-heure au passage de la partie convective

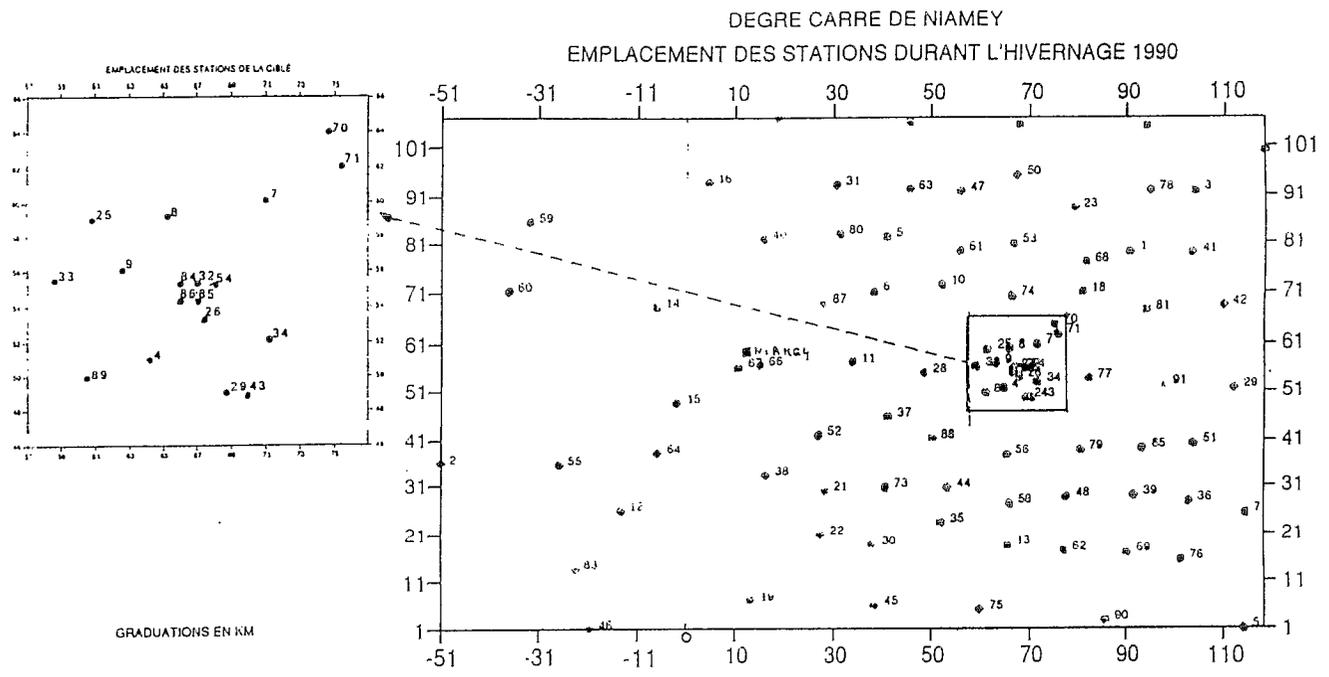


Figure 4 : le réseau de pluviographes à mémoire statique.

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 km² 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 les erreurs de mesure du pluviomètre sont assez bien connues, 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.

3.2 La redistribution de l'eau précipitée

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) ou d'évaporation (e.g; Pouyaud, 1986). Les premières tentatives de modélisation à l'échelle du bassin de quelques dizaines de km², 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. La plupart des 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 observées. 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 le forcer à adapter ses paramètres aux séries observées, sans aucun égard pour la réalité physique. 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, soit parce qu'il doit être intégré sur des surfaces plus grandes que celles sur lesquelles il a été validé, soit parce qu'il faut l'appliquer sur des zones où on ne dispose que d'un petit nombre d'observations élémentaires.

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.

4. UNE MODELISATION PARTICULIERE

4.1 Les grandes unités du système hydrologique

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. En effet, 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 peut alors localement se rapprocher de la surface, favorisant également l'évapotranspiration.

Enfin, un autre élément déterminant du paysage hydrologique est constitué par la brousse tigrée implantée sur les plateaux gréseux. 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 des nombreuses mares de taille assez faible et des talus qui font communiquer les plateaux avec les bas-fonds (fig. 5).

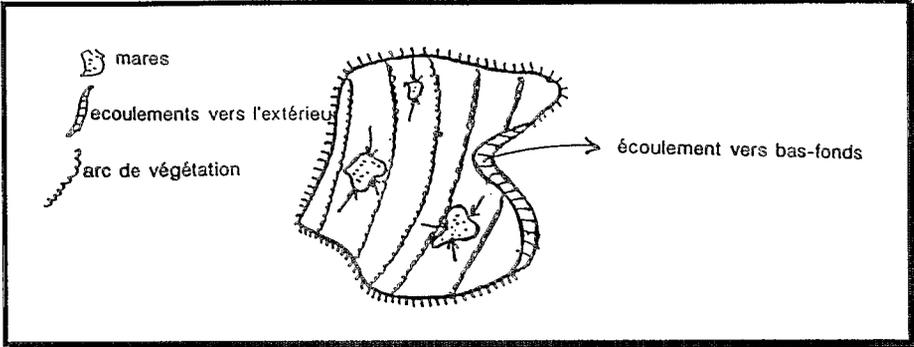


Figure 5. Schéma d'une zone de brousse tigrée

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 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 km² 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 (échelle d'intégration, précision, ...) et nos connaissances sur les mécanismes, quand elles existent.

4.2 Le cas particulier de la brousse tigrée

Comme on l'a vu plus haut, la brousse tigrée est un milieu hostile pour l'hydrologue. Les écoulements y sont pratiquement inexistants. La répartition de l'eau est avant tout sous le contrôle de la végétation, ce qui requiert une approche tout à fait inhabituelle pour lui. 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 $5 \times 5 \text{ km}^2$, 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 $1 \times 1 \text{ km}^2$ 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.

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 7,5x7,5 km².

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.

5. CONCLUSION

La mise sur pied de grosses expériences multidisciplinaires est indispensable pour approcher globalement les problèmes de climat et d'environnement qui apparaissent de plus en plus comme cruciaux pour l'avenir de notre planète. L'ampleur des moyens dégagés et la qualité reconnue des équipes impliquées ne doivent pas masquer que nous sommes encore très mal préparés à ce type de projet. Nos habitudes de scientifiques spécialisés, la tendance à isoler des questions pointues et à les traiter indépendamment du contexte dans lequel elles prennent leur sens, nous éloignent de cette vision d'ensemble si nécessaire à la réalisation d'une expérience telle que HAPEX-SAHEL. Pour ce qui concerne l'hydrologie, les perspectives ouvertes par HAPEX-SAHEL concernent aussi bien l'ouverture vers d'autres disciplines et le retour vers une hydrologie de grande échelle, que des progrès méthodologiques qui, pour être moins spectaculaires, ne devraient pas pour autant être tenus pour négligeables.

Ainsi, on peut espérer retirer des enseignements fructueux de la comparaison entre un modèle spatialisé classique et un modèle distribué et stochastique. On s'efforcera également 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 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.
- 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, Worl 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. hydrolog., 12(3), 167-188, 1975
- HOEPPFNER, M., T. LEBEL and H. SAUVAGEOT, EPSAT-NIGER a pilot experiment for rainfall estimation over West Arica, WMO/IAHS/ETH Workshop on Precipitation Measurement, Proceedings pp 251-259, St Moritz, 1989.
- 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.
- THAUVIN, V., and T. LEBEL, EPSAT : study of rainfall over the SAHEL small time steps using a dense network of recording raingauges. WMO/IAHS/ETH Workshop on Precipitation Measurement, Proceedings pp 260-267, St Moritz, 1989