

TP 287

1981  
1980

# REFLEXIONS POUR UN PROGRAMME ORSTOM SUR LE CYCLE DE L'EAU À LA MÉSO-ÉCHELLE

Luc LE BARBE - Thierry LEBEL

NIC... 1981

## AVANT-PROPOS

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : B \* 20434 Ex : unique

Le texte présenté ici est né d'une réflexion sur un positionnement possible des hydrologues de l'ORSTOM, et éventuellement d'autres spécialistes des milieux continentaux, vis à vis d'une double problématique :

- \* la gestion des ressources en eau à l'échelle régionale;
- \* les interactions entre le cycle hydrologique continental et la circulation atmosphérique.

Ce rapprochement peut surprendre et pourtant ces deux thèmes de recherche posent des questions et appellent des méthodes d'étude qui sont souvent convergentes, ne serait-ce que parce que les échelles de travail sont voisines. La gestion de la ressource passe par une bonne évaluation préalable de cette ressource et se préoccupe de son évolution en fonction des contraintes anthropiques ou climatiques qui pèsent sur elle.

Elle nécessite donc une compréhension et une modélisation des processus hydrologiques, aux échelles régionales et sous-régionales. De son côté la prise en compte des processus hydrologiques dans les modèles atmosphériques se heurtent aujourd'hui à un obstacle fondamental qui est la pauvreté des paramétrisations proposées par les spécialistes aux échelles pertinentes. La cause profonde de cette faiblesse réside dans le fait que les hydrologues se sont rarement souciés de bâtir un corpus de concepts et de méthodes pour passer des connaissances sur les processus élémentaires à leur intégration dans une modélisation de grande échelle, celle-là même qui est requise à la fois par la gestion des ressources régionales et par le couplage continent-atmosphère.

Notre réflexion ne saurait être la forme achevée d'un programme d'hydrologie globale. Nous ne pouvons en effet prétendre réunir toutes les compétences permettant de détailler l'ensemble des questions posées et des démarches à suivre pour les résoudre. La définition d'un tel programme ne peut résulter que de la confrontation des points de vue des personnes se sentant concernées. Ce texte n'a pour ambition que de présenter le nôtre.

En gros les thèmes abordés peuvent être classés en trois catégories:

- \* ceux pour lesquels nous possédons à la fois une vision globale des principaux enjeux scientifiques et pour lesquels nous pouvons définir un programme de recherche complet. Tel est le cas, par exemple de la

Planification stratégique  
 Méthodologie

Fonds Documentaire ORSTOM  
 010020434  
 LEBEL - BARBE

Hydrologie  
 Cycle de l'eau  
 ressources en eau  
 Atmosphère (couplage)

Hydrologie  
 caractérisation  
 besoin

pluviométrie pour laquelle nous avons déjà proposé un tel programme en juin 1992;

- \* ceux pour lesquels la démarche générale à adopter nous apparaît clairement et pour lesquels nous pouvons détailler certaines actions de recherche tout en ayant conscience de certaines lacunes, parfois importantes, qui restent à combler. Notre réflexion sur la caractérisation du milieu en est à ce stade;
- \* ceux pour lesquels les besoins sont identifiés, sans que nous ayons pu faire beaucoup mieux que les énumérer et esquisser comment les satisfaire pour rester cohérent avec l'ensemble de notre approche. Les études sur l'ETR, particulièrement sa régionalisation en sont le meilleur (ou le plus mauvais !) exemple.

Le volume occupé par chaque thème ne représente donc en aucune manière son importance intrinsèque pour l'ensemble de la problématique. On objectera que dans ces conditions il eût mieux valu se limiter aux sujets que nous maîtrisons. Nous avons pensé que cette attitude aurait été un refus d'aborder ouvertement les défis qui nous sont posés à la fois par l'apparition de questions scientifiques nouvelles (l'hydrologie globale; les changements climatiques) et par l'impact que ces questions doivent avoir au sein de l'ORSTOM. Cela ne signifie pas que l'ORSTOM doive à tout prix définir un programme de recherche traitant toutes les facettes de l'hydrologie globale et des changements climatiques. Mais il est essentiel d'avoir présent à l'esprit tous les grands thèmes impliqués et les relations qu'ils entretiennent entre eux pour faire des choix en toute connaissance de leurs conséquences.

On remarquera l'absence pratiquement complète de références bibliographiques dans notre texte. Nous n'avons en effet cité que 2 ou 3 articles dont étaient tirés certains exemples concrets, à priori peu connus. Il est devenu coutumier de citer une abondante bibliographie lorsqu'on écrit des textes scientifiques, ne serait-ce que pour montrer que l'on dispose d'une connaissance suffisante des travaux antérieurs sur le sujet (et ne pas offusquer le reviewer potentiel). Dans un texte tel que celui-ci qui touche à de très nombreux domaines de l'hydrologie, les références adéquates se compteraient par dizaines. Rien que sur la section 3.2.1, traitant des approches globales et analytiques dans la modélisation des systèmes convectifs de méso-échelle, plus de 50 références importantes pourraient être réunies. Il nous a donc paru inutile de noyer le lecteur sous un déluge bibliographique, que les plus avertis, ou spécialistes d'un domaine donné, connaissent déjà et que les autres pourront aisément découvrir lorsqu'ils souhaiteront aller au-delà des généralités de notre texte.

Une dernière difficulté qui s'est présentée à nous est celle de la terminologie. Étant située à la croisée de plusieurs disciplines, notre problématique souffre d'une confusion des termes: ambiguïté, manque de précision, voire emplois contradictoires (la grande échelle des géographes est celle de la parcelle, celle des climatologues représente la planète). Nous prions donc le lecteur de nous excuser par avance des faux-pas sémantiques que nous aurions pu commettre.

## 1. MODÉLISATION CLIMATIQUE. GEWEX & HYDROLOGIE

Le désir de prédire le climat est né avec les sociétés humaines. La vie des hommes est en effets très dépendante des aléas climatiques et les connaître c'est souvent pouvoir aussi s'en protéger. La prédiction de Joseph a permis au pharaon de limiter les conséquence des sept plaies d'Égypte.

Actuellement l'évaluation des risques climatiques se fait par référence aux climats récents. On suppose que l'avenir sera comparable au passé. Manifestement, cette démarche n'est pas satisfaisante même à court terme. En Afrique Soudanienne, par exemple, beaucoup d'aménagements hydro-agricoles conçus avant la fin des années soixante se sont révélés non rentables, en grande partie à cause d'une baisse de la pluviométrie, amorcée vers 1970, qui s'est traduite par une baisse de près 40% des écoulements.

L'enjeu de la prévision climatique est donc considérable. Il acquiert de nos jours une dimension supplémentaire. En effet, il semble que l'homme, pour la première fois de son histoire est susceptible d'influer sur les climats de la planète. On peut s'inquiéter par exemple des conséquences climatiques que pourrait avoir le doublement du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère tel qu'il est prévu d'ici soixante ans si l'activité industrielle de la planète continue sur sa lancée actuelle.

L'enjeu de la prévision climatique devient alors énorme puisqu'il ne s'agit pas seulement de décrire l'avenir mais bien de pouvoir agir sur lui.

- \* -

Prévoir le climat, c'est d'abord le modéliser. Il s'agit donc d'intégrer sur la planète entière les multiples phénomènes qui sont à l'origine des transferts d'énergie des régions qui en reçoivent le plus (la bande inter tropicale) vers celles qui en reçoivent le moins (les pôles). Ces échanges se font par l'intermédiaires des circulations atmosphérique et océanique sous forme d'énergie cinétique, de chaleurs sensible et latente.

La circulation atmosphérique peut être décrite par les équations de la physique, intégrées à l'échelle du globe. Les mailles et le pas de temps de calcul utilisés dans les modèles climatiques globaux (MCG), sont ceux imposés par cette intégration numérique.

Les océans ont une inertie beaucoup plus grande que l'atmosphère. La circulation océanique se fait à des échelles de temps également beaucoup plus grandes. C'est pour cela que dans un premier temps, les influences océaniques n'étaient prises en compte dans les MCG que sous la forme de conditions aux limites. Il y avait là une cause d'imprécision et au cours de ces dernières années, un effort de recherche très important a porté sur le couplage des modèles atmosphériques et océaniques.

Mais la modélisation du climat ne se limite à celle des circulations atmosphérique et océanique. Une part importante des transferts d'énergie résulte aussi de processus qui ne peuvent être résolus de façon mathématiquement rigoureuse, soit parce que la taille de la maille des MCG est trop grande par rapport à l'échelle imposée par le processus lui même, soit parce que cela exigerait une connaissance inaccessible des conditions aux limites. De tels processus sont pris en compte dans les MCG par une modélisation conceptuelle. On dit alors qu'ils sont paramétrisés. C'est le cas notamment du cycle hydrologique sur les surfaces continentales et des effets de l'ennuagement sur le rayonnement. Ces deux paramétrisations font parties des aspects des MCG les plus susceptibles d'améliorations. Elles constituent les deux branches du programme GEWEX initié par le Programme Mondial sur le climat (PMRC ou WCRP en anglais).

GEWEX (Global Energy and Water EXperiment), malgré son nom, n'est donc pas une expérience comme l'était HAPEX-SAHÉL mais d'avantage une problématique posée par les modélisateurs du climat aux chercheurs des disciplines concernées.

- \* -

Un modèle climatique a besoin d'estimer sur chacune de ses mailles continentales et à chaque pas de temps de calcul, la quantité d'eau fournie par la surface à l'atmosphère, c'est à dire la moyenne spatiale de l'ETR.

Ce calcul doit se faire à partir d'entrées fournies par le MCG qui sont la lame précipitée sur la maille et un ensemble de paramètres météorologiques permettant de définir la demande évaporatoire de l'atmosphère (ensemble que nous désignerons par EP). La validité de ce calcul doit être nécessairement indépendante du climat. Les concepts de la modélisation doivent donc s'appuyer sur des processus physiques. L'ETR en un point est fonction de EP, mais aussi de l'humidité du sol et de la végétation. Le MCG doit donc gérer les entrées et les sorties d'un ou de plusieurs 'réservoirs sol'. Il doit donc être capable de modéliser la production des écoulements et du drainage vers les nappes. Le rôle de la végétation doit être explicité.

Les processus n'étant ni additifs ni linéaires, il est indispensable de prendre en compte les hétérogénéités du milieu (relief, nature des sols, et de la végétation), des entrées (pluies et EP) et des états (eau dans le sol et végétation). Il n'est cependant pas envisageable de décrire ces hétérogénéités à partir d'une discrétisation aussi fine que l'exigerait les processus pour des raisons de temps de calcul mais surtout parce que cela impliquerait une connaissance inaccessible du milieu. Les concepts de modélisation doivent s'appliquer à des surfaces relativement grandes. Les paramètres de la modélisation doivent pouvoir être déduits d'observations faites à des échelles différentes que celle des MCG.

Enfin, le milieu, et plus spécialement la végétation, évolue avec le climat. A la modélisation de court terme dont nous avons précisé les contraintes, doit se superposer une modélisation de long terme des interactions entre le climat et l'environnement.

La problématique que nous venons rapidement d'évoquer, est très proche de celle que l'on pourrait définir pour une évaluation régionale des ressources en eaux. En définitive, les modélisateurs du climat posent aux hydrologues, dans de nouveaux termes, les questions lancinantes de l'hydrologie au sens large, celle du "transfert d'échelle" et celle de la transposabilité des modèles. Ces questions ont très souvent fait l'objet de débats à l'ORSTOM, mais rarement de programmes de recherche. Le présent document est essentiellement une réflexion sur cette problématique dans le but d'essayer de définir, au niveau de l'ORSTOM, un projet scientifique pour contribuer à sa résolution.

## 2 PROBLÉMATIQUE

La modélisation climatique nécessite, pour chaque maille, une paramétrisation du cycle hydrologique qui puisse être déterminée à partir du climat et d'une description du milieu.

Ce besoin est celui des gestionnaires de la ressource en eaux. Ceux-ci, en effet, doivent d'abord avoir une vision régionale de son importance et de sa variabilité spatio-temporelle. Pour dresser un tel inventaire, ils ne disposent en règle générale que d'observations faites en un nombre limité de points. Ils doivent donc pouvoir transposer géographiquement les modèles hydrologiques calés à partir de ces observations. Cette convergence entre les besoins des gestionnaires de la ressource et ceux de la modélisation globale du cycle de l'eau amène à identifier deux problématiques pour le programme proposé ici :

- \* la première est liée la mise au point d'une modélisation hydrologique de grande échelle obéissant à la contrainte de transposabilité; cette modélisation devra donc être basée sur celle des processus physiques à l'origine de la redistribution des précipitations au sein du système hydrologique considéré;
- \* la seconde problématique, propre aux questions de modélisation du climat mais qui n'est pas sans intérêt pour une gestion à long terme des ressources, est celle des interactions à long terme entre climat et surfaces continentales. Celles-ci ne peuvent être prises en compte dans la modélisation précédente soit parce qu'elles sont fonction d'autres facteurs, notamment anthropiques, soit parce qu'elles sont régies par des phénomènes d'échelle temporelle beaucoup plus grande.

### 2.1. Quelle modélisation ?

Rechercher une modélisation régionale en hydrologie suppose qu'il est possible, à partir d'un certain domaine d'intégration, de considérer comme homogène un milieu très hétérogène, et de décrire directement à cette échelle les phénomènes. On veut en outre que les lois régionales soient transposables donc le plus physiques possible.

Cette démarche n'est pas propre à l'hydrologie. On peut par exemple modéliser le passage d'un courant électrique dans un corps sans qu'il soit nécessaire d'identifier le parcours des électrons au niveau atomique. De la même façon, la loi de DARCY décrit directement les flux d'eau dans le sol sans se préoccuper des écoulements à l'intérieur des pores. En règle générale, les lois macroscopiques ont été trouvées à partir d'expérimentations faites à cette échelle. La démonstration de leur cohérence avec les lois microscopiques n'a pu être faite que bien plus tard par la physique statistique.

En hydrologie, la démarche expérimentale à l'échelle régionale paraît difficile. Cela suppose en effet de pouvoir identifier de grands bassins homogènes, ce qui sera rarement possible. Cela suppose aussi de pouvoir faire des mesures à cette échelle, ce qui est pratiquement irréalisable pour la plupart des termes du bilan. Cela suppose enfin de pouvoir expérimenter pour suffisamment de conditions initiales, or on ne peut le faire que pour celles offertes par la nature, ce qui ne constitue presque jamais un protocole idéal car trop lié à un climat donné. Par ailleurs, à l'inverse des exemples cités plus haut, les lois macroscopiques recherchées résultent de processus complexes s'appliquant sur un milieu très hétérogène. Il n'est donc pas possible d'appliquer les méthodes de la physique statistique.

### 2.1.1. Un problème central: l'hétérogénéité du milieu

Une perception absolument juste d'un milieu hétérogène n'existe pas. Il n'est pas possible de préciser la position de chaque grain de matière dans l'espace et dans le temps. Une description se rapporte toujours à un certain niveau d'intégration et est fondé sur une certaine stabilité des agencements des hétérogénéités. Les organismes vivants sont des milieux très hétérogènes, il est cependant possible d'identifier des cellules, des organes et de reconnaître une vache d'un homme. Une description, est toujours associée à l'utilisation que l'on veut en faire. Pour évaluer le poids de viande d'un troupeau de vaches, il ne viendrait à l'idée de personne, de peser chaque cellule musculaire de chacune des bêtes. On comptera plutôt le nombre de têtes d'où on déduira de façon statistique le poids total.

D'une façon un peu comparable, la régionalisation hydrologique passe par l'identification de structures organisées à partir des quelles pourront être définies des zones homogènes. Ces zones ne peuvent se déduire d'une analyse séparée de chacun des éléments constitutifs du paysage. Elles seront toujours relatives à un concept de modélisation

### 2.1.2 Une nécessité: prendre en compte la distribution spatiale des entrées

Les processus hydrologiques ne sont en règle générale ni additifs ni linéaires. Les entrées, notamment les précipitations, sont des champs hétérogènes mais qui sont eux aussi organisées. La réponse d'un système hydrologique va dépendre de l'importance relative des échelles des structures décrivant le milieu et les entrées. (cf. Fig. 1). L'objectif de transposabilité de la modélisation impose donc qu'y soit explicitée l'influence de la variabilité spatiale des entrées. Un milieu qui pourrait être considéré comme homogène pour un certain type d'entrée ne le sera pas pour un autre. Par exemple la loi de Darcy n'est une approximation valable de la réalité du transfert macroscopique dans un sol que sous l'hypothèse d'une charge égale partout en surface.

### 2.1.3 Deux approches possibles complémentaires

L'objectif est donc de trouver des lois régionales valides pour un milieu homogène<sup>1</sup> et d'en déduire une modélisation secondaire simple applicable à des bassins ou à des mailles de MCG pouvant s'étaler sur plusieurs 'zones homogènes'.

La détermination de ces lois régionales ne peut se faire que de façon indirecte. Deux approches symétriques sont possibles, l'une est globale, l'autre est analytique.

**L'approche globale.** Par analogie, ou simplement par intuition, on définit a priori les zones homogènes et on se fixe pour chacune d'entre elles une loi régionale qui soit transposable. La validation des hypothèses ne peut reposer que sur celle de la modélisation secondaire qui en résulte.

**L'approche analytique.** On se fixe un premier niveau de modélisation. A partir d'une description adéquate du milieu et des entrées, on en déduit les lois régionales par une intégration spatiale du modèle primaire. Le niveau primaire sera choisi en fonction de trois contraintes :

- a) il faut d'abord qu'il corresponde à une échelle où l'expérimentation est possible;

<sup>1</sup> La notion d'homogénéité est relative à une échelle d'observation ou de conceptualisation. Un plateau peut-être considéré comme homogène à l'échelle humaine (absence de relief marqué) et très hétérogène à l'échelle de la fourmi (présence de micro-reliefs sans structure bien définie). Il en est de même à l'échelle régionale où un assemblage régulier d'unités élémentaires de quelques dizaines de km<sup>2</sup> peut se présenter comme un ensemble globalement (ou régionalement) homogène.

- b) il faut ensuite que l'on puisse lors de l'intégration spatiale prendre en compte les interactions entre deux éléments primaires;
- c) il faut enfin pouvoir décrire en conséquence le milieu (c'est à dire celui caractérisant chaque élément du niveau primaire et la façon dont ces éléments composent le milieu régional);

Pour reprendre l'analogie avec le vivant: si on voulait modéliser la tenue d'une mêlée de rugby, il est évident qu'il ne serait pas possible de le déduire d'un modèle de fonctionnement des différentes cellules humaines. Cela le serait peut être à partir d'un modèle musculaire, mais il serait bien plus facile de modéliser la poussée exercée par un homme en fonction de sa morphologie et d'intégrer celles des 16 joueurs en prenant en compte leurs positions respectives.

Par rapport à la démarche globale, la méthode analytique présente l'avantage principal de relier les lois régionales aux modèles applicables à des échelles accessibles à l'observation. Il y a donc un niveau supplémentaire de validation et cela laisse entrevoir une meilleure possibilité de transposition. Par simulation sur des milieux réels ou fictifs, cela permettrait de préciser les domaines spatio-temporels de validité des lois régionales en fonction du climat. Sa mise en oeuvre sera cependant plus complexe. L'approche globale peut, elle, permettre un diagnostic beaucoup plus rapide sur l'influence de tel ou tel facteur. Ces deux approches symétriques sont aussi complémentaires.

#### 2.1.4 Deux exemples

Pour illustrer ce qui précède nous allons prendre deux exemples. Le premier se rapporte à la paramétrisation hydrologique des MCG, le second à la transposition des modèles hydrologique.

#### **Vers une approche analytique : la Paramétrisation d'ENTHEKABI et EAGLESON (Journal of climate - 1989 - 2,8)**

On trouvera détaillée en annexe la paramétrisation proposée par ENTHEKABI et EAGLESON pour améliorer la prise en compte des processus hydrologiques dans les MCG. Nous n'en donnerons ici qu'un aperçu permettant d'illustrer notre propos.

L'objectif de cette modélisation est de permettre, à chaque pas de temps de calcul des MCG, l'estimation des moyennes sur une maille, de l'humidité du sol, du ruissellement, de l'évaporation, et de la transpiration.

L'état initial est défini, par une humidité moyenne,  $S$ . Les humidités ponctuelles,  $s$ , sont réparties dans l'espace selon une loi gamma de moyenne  $S$  et de coefficient de variation,  $cv$ , paramètre du modèle. La fréquence au dépassement de la valeur 1 représente la proportion de surfaces saturées.

L'état final est déterminé par le bilan des entrées effectives dans le sol (les eaux non écoulées) et des sorties (l'évapotranspiration).

Pour la production des écoulements, les auteurs retiennent deux processus ponctuels, celui de HORTON pour les surfaces non saturées, celui de DUNNE pour celles qui le sont. Dans le premier cas, on évalue l'infiltration à partir d'une simplification de la loi de DARCY généralisée qui exige trois paramètres, caractéristiques du sol, et deux variables, l'humidité du sol et l'intensité de la pluie. Dans le second cas, la totalité de la pluie ruisselle. A ce stade les auteurs introduisent une nouvelle hypothèse. Ils supposent que la pluie moyenne,  $P$ , précipitée par le modèle, ne tombe que sur un certain pourcentage,  $K$ , de la surface, fonction de la nature des précipitations. Sur l'ensemble des aires touchées par la pluie, ils admettent que la distribution des intensités suit une loi exponentielle de moyenne  $P/K$ .

Le calcul de la moyenne spatiale des écoulements se fait en intégrant les expressions ponctuelles selon les lois de probabilités de la pluie et de l'humidité du sol.

L'évapotranspiration est calculée d'une façon analogue. Les processus ponctuels sont décrits par les équations de PHILIP, pour l'évaporation; par le modèle de FEDDES, pour la transpiration. Ce qui exige 3 paramètres de plus, 2 pour le sol et 1 pour la végétation.

Bien que cette paramétrisation soit fondée sur une intégration de processus ponctuels, elle ne résulte pas de ce que nous avons appelé une approche analytique dont le niveau primaire serait la parcelle. Elle suppose en effet l'additivité des phénomènes à cette échelle, ce qui est manifestement faux. Il s'agit en fait d'une modélisation globale établie par analogie avec ce qui est observable sur une parcelle. Si le concept retenu semble logique, il doit cependant être validé. Il est peu probable que les paramètres puissent être déduits de mesures ponctuelles, ils seront plutôt issus d'une calibration.

### **Les modèles hydrologiques globaux**

Les modèles hydrologiques qui considèrent un bassin versant comme un tout procèdent clairement d'une approche globale. Le programme ERREAU du DEC, par exemple, a testé en Côte d'Ivoire la possibilité de prédéterminer les trois paramètres (2 de capacités et 1 de transfert) d'un modèle hydrologique global simple, GR3. Pour cela, il a calé ce modèle sur des chroniques de bassins observés et a recherché des relations fonctionnelles entre les paramètres obtenus et des descripteurs du milieu. Cette démarche est un peu différente de celle que nous proposons. L'ensemble formé par GR3 et les relations explicative des paramètres, est identique à ce que nous avons appelé la modélisation secondaire. En revanche, les lois régionales ne sont pas explicitées. Selon notre schéma, des zones homogènes seraient identifiées a priori, puis une fonction de production déterminée pour chaque zone, le rôle de chacun des descripteurs du milieu étant paramétrisé. La calibration aurait porté simultanément sur l'ensemble des bassins observés, tirant parti de l'information comparative entre des bassins semblables selon un critère, et différents selon un autre (même type de végétation mais au développement décalé dans le temps par exemple). Par ailleurs, dans GR3, les entrées sont constituées des valeurs moyennes de la pluie et des ETP sur les bassins, ce qui limite les possibilités de transposition.

## **2.2. LES INTERACTIONS A LONG TERME**

La problématique précédente se situe dans le court terme. Il s'agissait de modéliser les interactions entre le climat et la surface continentale pour un milieu stable aux variations saisonnières près.

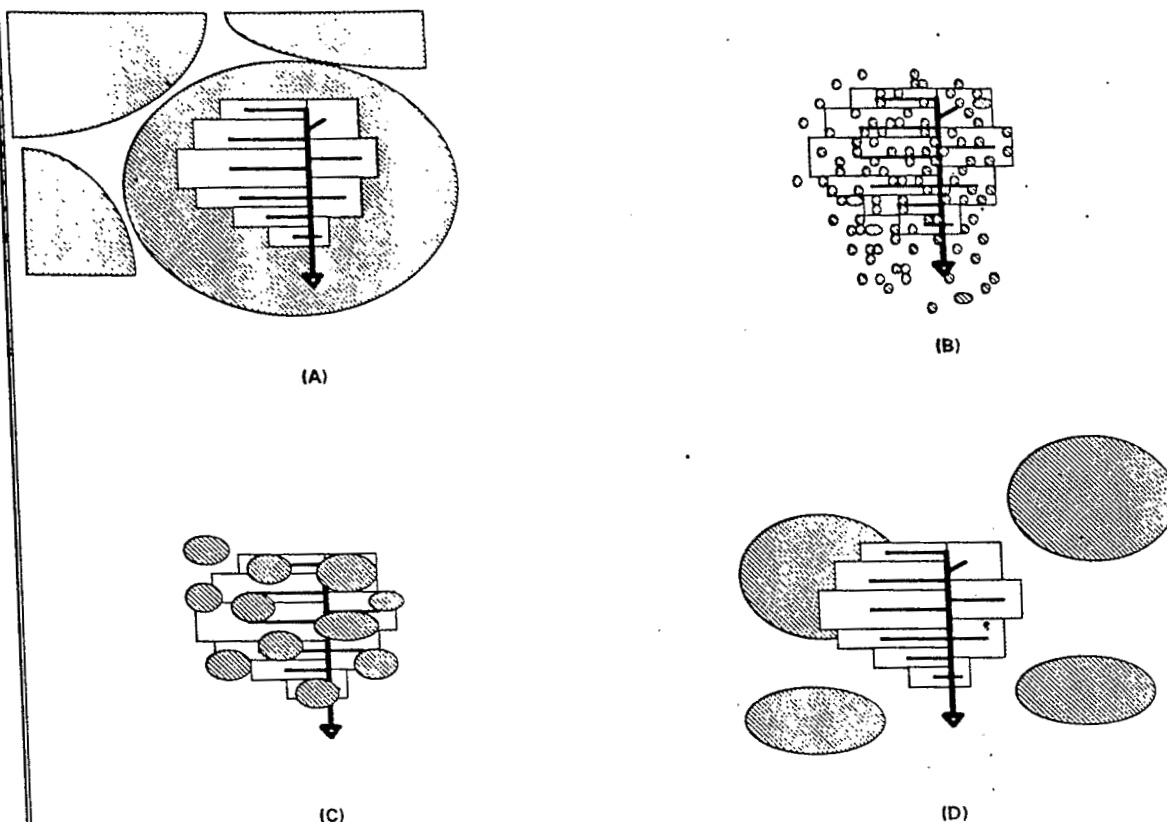
La paléoclimatologie nous apprend qu'au cours des 20 000 dernières années, le SAHARA a connu des alternances de périodes de verdure (il y avait des girafes et des hippopotames au Nord de l'AIR) et de désert. La modification actuellement observée de la composition de notre atmosphère oblige à envisager la possibilité changements climatiques significatifs pour les siècles à venir. La modélisation climatique pour être crédible, devrait être capable de prévoir l'évolution à long terme du milieu, susceptibles d'induire des effets de feed-back positif ou négatif. Le problème est donc de modéliser la réponse d'un milieu à une variation climatique.

Un environnement ne dépend pas uniquement du climat présent mais aussi des climats antérieurs et d'autres facteurs notamment anthropiques. La profondeur d'une nappe souterraine peut permettre ou non la survie d'une végétation (cf. l'exemple extrême de l'arbre du TENERE). L'accroissement démographique, conjuguée à une sécheresse persistante, peut entraîner l'accélération du rythme de rotation des terres et une diminution des jachères d'où une action sur les sols et la végétation.

La compréhension de ces interactions à long terme passe par l'étude de la dynamique actuelle des sols et de la végétation et par l'analyse de paléoclimats. Elle suppose également que les résultats de la simulation climatique puissent permettre de suivre l'évolution des nappes souterraines. Elle peut nécessiter la mise au point de scénarios démographiques réalistes.

Ces différents thèmes de recherche requièrent des compétences qu'il est difficile d'identifier au sein de l'ORSTOM à ce stade de la réflexion, tournée essentiellement vers l'intérieur de notre Institut. Néanmoins la nécessaire cohérence d'un programme consacré aux aspects hydrologiques de la modélisation climatique nécessitera de se préoccuper rapidement des moyens à mettre en oeuvre pour aborder ces thèmes, à travers des collaborations adéquates, internes ou externes à l'ORSTOM.

FIG. 1: ILLUSTRATION DE L'IMPORTANCE RELATIVE DES ECHELLES DES HETEROGENEITES SPATIALES DE LA PLUIE ET DU RELIEF



**LEGENDE:**

- L'assemblage de petits rectangles schématise un bassin. Chaque rectangle représente un bassin élémentaire.
- On suppose que les champs de pluies sont constitués d'aires disjointes de forme plus ou moins circulaire, et où les intensité de pluies sont constantes.

Les dessins (A) à (D) schématisent quatre situations selon les tailles des structures des champs de pluies comparées à celles du bassin.

Si dans une région donnée, les champs de pluies s'agencent selon (A) ou (B), la modélisation globale est justifiée.

Dans le cas (C) et plus encore dans le cas (D), la modélisation globale ne deviendra pertinente qu'après l'intégration d'un certain nombre de champs.

Dans tous les cas, les réponses du bassin à une même pluie moyenne, seront très différentes. La transposition des paramètres ne sera possible que si le modèle prend en compte la répartition spatiale (et temporelle) des pluies.

### 3. PROPOSITION D'UNE DÉMARCHE

#### 3.1 Contraintes imposées par l'objectif de modélisation climatique

Pour répondre aux objectifs de la modélisation du cycle de l'eau aux échelles régionales et supérieures, il faut proposer une modélisation hydrologique qui soit transposable. Cette exigence n'est pas propre aux échelles de travail que l'on privilégie ici, elle est en fait au coeur de la problématique générale du développement de modèles en hydrologie: un modèle de bassin-versant, quelle que soit la taille de ce dernier, doit produire des résultats satisfaisants sur des périodes autres que celles dont les données ont été utilisées pour sa mise au point. De plus, pour que le modèle ne soit pas le modèle du bassin X ou du bassin Y, il doit pouvoir être utilisé pour tout autre bassin de taille comparable situé dans une même zone géographique (c'est à dire dont les caractéristiques du milieu soient semblables). De ce point de vue, la démarche à développer sera analogue quel que soit l'objectif final de la modélisation : gestion de la ressource en eau dans un contexte climatique donné ou simulation et anticipation des possibles interactions entre changements climatiques et comportement des systèmes hydrologiques. Par contre cette dernière perspective impose que le modèle puisse assimiler les changements de climat, exigence qui ne sera pas véritablement nécessaire pour la gestion des ressources en eau sous hypothèse de climat peu variable.

Cette exigence a ses conséquences sur l'indépendance qu'elle requiert entre la paramétrisation des entrées climatiques (en premier lieu desquelles la pluie) et celle du milieu. On ne pourra pas se contenter de tenir compte implicitement de la variabilité des entrées et des hétérogénéités du milieu sous prétexte qu'elles se développent à des échelles similaires (par exemple) et se compensent d'une certaine manière. En effet même si on suppose une certaine adaptation du milieu à un changement climatique, elle sera généralement lente et procédera peut-être par bonds successifs. Pour être capable de reconstituer ces états de transition successifs le modèle doit expliciter la variabilité des entrées d'une part, le rôle joué par les hétérogénéités (et les périodicités) du milieu d'autre part.

L'exigence fondamentale de transposabilité et d'assimilation de changements climatiques éventuels entraîne donc d'autres qui vont constituer des contraintes pour le développement du ou des modèles:

- La description du milieu devra être la plus indépendante possible de celle des variations des entrées (aucune échelle de variabilité de l'une de ces deux composantes ne devra être non résolue sous prétexte que la résolution requise n'est pas pertinente pour l'autre composante).
- Les sorties du modèle seront constituées par les ETR, débits ruisselés et flux d'alimentation/extraction des aquifères.
- Le rôle de la végétation devra être explicite, puisque c'est la variable du milieu la plus susceptible de changements rapides, par effets anthropiques ou climatiques.
- une dernière contrainte, partagée par tous les modèles de planification et de simulation, est l'impossibilité d'assimiler dans le modèle des données autres que les entrées: le recalage des variables d'état du modèle, telles que l'humidité du sol et le développement de la végétation est interdit, de même que le recalage résultant de la comparaison entre sorties calculées et sorties observées.

Ces différentes contraintes vont se traduire différemment pour chacune des deux approches proposées.



### 3.2 Approche globale versus approche analytique : deux exemples

En section 2 on a différencié deux approches possibles pour modéliser un système hydrologique à l'échelle régionale. Ces deux approches ont en commun de reposer sur une conceptualisation des processus à une échelle donnée, l'intégration des équations différentielles de la physique élémentaire étant inconcevable. Ils divergent par le choix de cette échelle.

**L'approche globale** est bâtie autour de la caractérisation des hétérogénéités à l'échelle régionale qui sont directement incorporées (paramétrisées) dans les concepts du modèle.

**L'approche analytique** applique l'approche globale pour le niveau dit "élémentaire" et l'intègre pour passer à l'échelle régionale. Comme toute intégration elle requiert la connaissance des conditions initiales (champ spatio-temporel des entrées) et aux limites (le milieu, lui même supposé invariant dans le temps).

Nous allons illustrer par deux exemples ce que peuvent être les 2 niveaux de conceptualisation d'une part (approche analytique, niveau élémentaire; approche globale, niveau global) et l'intégration d'autre part (cas analytique).

#### 3.2.1 *Le cas de la pluviométrie*

Les précipitations des zones tropicales sur lesquelles travaille l'ORSTOM sont de nature essentiellement convectives, organisées en systèmes de méso-échelle, d'où la dénomination de "systèmes convectifs de méso-échelle", ou SCM. La structure de ces SCM a été étudiée assez abondamment au cours des quinze dernières années, que ce soit pour les zones tropicales ou extra-tropicales. Le modèle physique résultant de ces études est aujourd'hui largement accepté dans ses grandes lignes.

L'élément de base en est la cellule (taille: 1 à quelques km<sup>2</sup>; durée de vie: moins de 10 minutes), les cellules étant organisées en "amas" ou "clusters" (taille: 1 à quelques centaines de km<sup>2</sup>; durée de vie: une à quelques heures). Le SCM est constitué d'un ensemble de clusters dont l'agencement peut varier d'une région à l'autre selon le type de circulation atmosphérique (voir par exemple Houze R. A. et Al., 1976 : Mesoscale rainbands in extra tropical cyclones, *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 868-878, ou Houze R. A., 1977 : Structure and dynamics of a tropical squall line system *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1540-1567).

Les observations faites durant EPSAT-NIGER valident largement ce modèle et conduisent à identifier comme niveau primaire d'une modélisation des SCM la cellule. Compte tenu de l'objectif il serait irréaliste et probablement sans issue de développer une modélisation physique de ces cellules, dont le développement est conditionné à la fois par les structures synoptique et de méso-échelle de l'atmosphère, et par la convection locale. Dans une perspective hydrologique, une modélisation stochastique de la répartition interne des intensités pluvieuses, de la taille de ces cellules, de leur densité et de leur agencement dans l'espace sous forme de clusters semble suffisante à rendre compte des grands traits de la répartition spatiale des pluies telle qu'elle doit être prise en compte dans la modélisation des bassins versants. Si on s'intéresse à des bassins d'une taille supérieure à celle des clusters il faudra aussi étudier et modéliser l'agencement spatial des clusters selon un schéma analogue à celui retenu pour les cellules.

Une telle modélisation à deux niveaux correspond à l'approche analytique telle que nous la définissons. Elle sera nécessaire si le milieu est décrit dans le modèle avec une résolution comparable à la taille des cellules. On remarquera en passant qu'il est paradoxal de voir des modèles maillés avec des résolutions de l'ordre du km<sup>2</sup> utilisés avec une entrée pluviométrique globale. Même pour des modèles hydrologiques dits 'globaux', l'apport d'une telle discrétisation des entrées peut être intéressant dans la

mesure où les processus de production sont non linéaires (pour une même lame d'eau moyenne un bassin ruissellera plus si la pluie présente des zones de forte intensité voisines avec des zones de pluie faible ou nulle, que si elle est uniformément distribuée sur le bassin).

Dans certains cas néanmoins une modélisation directe de la répartition spatiale des précipitations aux échelles voisines de celle des clusters peut-être envisagée. Ceci sera particulièrement vrai lorsqu'une bonne estimation des moments d'ordre 1 de cette répartition est suffisante. Il existe alors des modèles simples d'intermittence et de répartition des cumuls au sein des zones pluvieuses qui permettent d'obtenir des résultats satisfaisants. On peut même dans certains cas faire abstraction de l'intermittence ce qui est la démarche de la géostatistique traditionnelle qui a montré sa souplesse d'utilisation et son efficacité dès lors qu'on travaille sur des durées suffisamment longues. De telles modélisations sont des modélisations globales : on n'explicite pas l'existence des cellules, l'intermittence modélisée correspondant plutôt à celle des clusters.

### 3.2.2 *Le cas du relief*

Le relief joue un rôle essentiel dans la redistribution des précipitations en surface, et même parfois dans le milieu souterrain (voir le concept des aires contributives). Or le relief peut être stratifié selon des critères semblables à ceux utilisés pour la pluviométrie. Le versant tient une place analogue à celle de la cellule dans le cas des précipitations (niveau élémentaire - production unitaire - échelles semblables). L'organisation des versants en bassins peut être comparée à celle des cellules pluvieuses en clusters. Enfin un ensemble régional de bassins, similaires mais agencés dans l'espace selon les grandes lignes dictées par le relief, peut être assimilé au SCM, les échelles d'espace concernées étant là encore du même ordre. Une modélisation du même type que celle décrite plus haut pour les SCM est donc envisageable. En particulier le 'paysage hydrologique' est constitué d'une juxtaposition de versants dont on néglige les interactions possibles, considérées a priori comme de seconde importance. La physique du ruissellement sur ces versants n'a pas besoin d'être explicitée pour rendre compte de leur rôle dans la constitution des écoulements à l'échelle de l'ensemble des bassins de la région. Leur agencement en bassins versants, pour lequel une description statistique peut suffire, et leur 'productivité' en terme d'écoulement sont les variables d'importance. On retrouve une modélisation à deux niveaux qui définit l'approche analytique.

L'approche globale est, elle, bien connue des utilisateurs de modèles hydrologiques dits précisément 'globaux', dans lequel le relief n'est utilisé que pour la composante de transfert, sous la forme d'un indice de pente du bassin par exemple. Ce genre de modèle présente les mêmes avantages que les modèles globaux de pluviométrie : ils sont aisés à mettre en oeuvre, ne nécessitent pas de données trop fines pour être calés et sont utilisables aussi bien pour valider des modèles plus complexes que pour une modélisation locale et non transposable. Leur défaut majeur réside précisément dans l'impossibilité de les transposer sans données de recalage.

Dans ce qui va suivre on va passer en revue quelles sont les implications, sur le plan des méthodes et sur celui des observations de ces deux démarches qui ne sont pas exclusives.

## 3.3 Approche globale

L'approche globale est celle la plus fréquemment utilisée dans les modèles hydrologiques. La modélisation globale ne se réfère pas à une échelle particulière. Il existe toute une série de modèles hydrologiques globaux qui sont utilisés de façon indifférenciée sur des bassins de quelques km<sup>2</sup> à plusieurs milliers de km<sup>2</sup>. Dans notre perspective la démarche globale n'est pas non plus opposée à la discrétisation spatiale.

Nombre de modèles discrétisés spatialement sont des juxtapositions de modèles globaux fonctionnant à l'échelle d'une maille. Le plus souvent le maillage sert essentiellement à spatialiser le transfert pour obtenir un étalement dans le temps du ruissellement produit et à tenir compte de la non homogénéité du couvert végétal et des sols.

L'approche globale repose sur des hypothèses, pas toujours explicitées, de similitude d'échelles. On en a vu un exemple particulier avec la paramétrisation proposée par Entekhabi. L'intérêt de cette dernière est néanmoins, à l'opposé de ce qui se fait d'habitude pour ce type de modèle, de coupler la distribution des humidités de surface et celle des précipitations pour obtenir une formulation analytique dont chaque paramètre a une signification physique précise.

L'approche globale que nous préconisons ici impose le développement des modèles de grandes unités hydrologiques construits autour de la prise en compte des hétérogénéités spatiales des entrées, du milieu et des états :

- \* prise en compte de l'intermittence des précipitations, dans le temps et dans l'espace;
- \* paramétrisation explicite du rôle joué par le relief, par analogie avec ce qui a été observé aux échelles de versant, en se basant sur une distribution spatiale des pentes (un milieu composé de nombreux versants courts et de dénivelé modérée se comporte différemment d'un milieu de grands versants raides);
- \* paramétrisation des hétérogénéités spatiales des humidités à chaque pas de temps de calcul;
- \* prise en compte de l'état de la végétation au cours de son cycle annuel et de son influence sur l'ETR;
- \* possibilité de travailler à des pas de temps variables et/ou emboîtés (la modélisation climatique requiert des pas de temps d'une demi-heure, les modèles de gestion de la ressource peuvent se contenter de pas de temps plus grands; dans tous les cas la validation se fera sur des durées plus longues).

La difficulté principale de l'approche globale, appliquée à des grands bassins, est de "synthétiser" le milieu en faisant ressortir les grands éléments de structure hydrologique. On est amené à ignorer les interactions qui peuvent exister entre ces grandes unités et à procéder par analogie avec les niveaux inférieurs. Cette démarche est semblable à celle adoptée par Entekhabi et Eagleson dans l'exemple fourni en section 2 (analogie de fonctionnement entre la parcelle et des unités de "sol homogène") et peut être illustrée sur un cas relativement simple qui est celui des brousses de plateau en milieu sahélien (dont la version la plus achevée est celle des "brousses tigrées"). Ces brousses sont constituées d'une alternance de bandes ou d'amas couverts de végétation et de larges zones de sol nu. On a ici une association très forte, répétée sur une grande partie du Sahel, entre une forme de relief (le plateau), un type de sol (argileux en surface, latéritiques en profondeur) et un type de végétation (des ligneux organisés en paquet). Bien entendu il existe de nombreux facteurs d'hétérogénéité à l'intérieur de ces ensembles (placages sableux, différence de la nature des végétaux entre les différents bords des amas, gradients de pentes, etc...). Néanmoins il est envisageable de paramétriser ces différentes hétérogénéités sans que leur échelle spatiale soit directement résolue dans le modèle. Par exemple l'alternance bandes nues/ amas de végétation peut être représentée par une fonction de distribution de la végétation permettant de respecter la densité moyenne de couverture sur l'ensemble du plateau et d'en exprimer la dispersion spatiale. On peut simplifier encore et ne prendre en compte que la densité d'ensemble, ignorant délibérément qu'elle résulte d'une moyenne entre deux populations distinctes, celle des sols nus et celle des sols couverts. L'intégration

dans le modèle régional se fait alors par une paramétrisation de la distribution des densités de couvert des différentes brousses de plateau de la région. On voit que, tout en étant très globale, cette approche permet néanmoins de simuler des effets d'évolution du couvert végétal, en faisant varier les paramètres de la fonction de distribution des densités à l'échelle régional (baisse d'ensemble traduisant la déforestation et/ou augmentation de la dispersion due à une exploitation intensive près des zones habitées et un maintien en l'état ailleurs).

La brousse de plateau est donc modélisée ici par analogie à ce qui pourrait être envisagé pour la modélisation d'un seul amas de végétation, sachant que cette analogie est grossière et fait abstraction de la complexité du milieu. L'avantage principal réside dans l'économie qui est ainsi faite de concevoir une modélisation complète et explicite des transferts entre les différentes unités du plateau, cette modélisation se heurtant à la difficulté de décrire correctement le milieu à cette échelle (obstacles de la pertinence et du nombre d'observations à réaliser). Cette approche aura besoin d'être validée, cette question étant abordée plus loin en section 3.5. Pour en terminer avec cet exemple simple, il faut néanmoins remarquer que l'approche globale ne permet pas d'explicitement l'influence fonctionnelle du plateau sur les unités avalées. Selon que cette influence peut être considérée comme simple et additive à l'échelle de la région ou qu'au contraire la diversité du milieu aval requiert de quantifier les transferts en les localisant, on pourra s'en tenir au schéma initial ou on devra envisager de descendre à un niveau unitaire inférieur et adopter une approche analytique telle que définie en section 2.

Les performances des modèles ainsi développés seraient d'abord comparées à celles des modèles globaux classiques. Leur finalité serait d'être des outils de validation pour la modélisation analytique (de la même manière que le modèle de SCM doit être capable de reconstituer le champ des courbes isohyètes saisonnières, sachant que ce champ peut aussi être interpolé par des fonctions continues dont l'intermittence, pourtant fondamentale aux petites échelles, est exclue).

Cet ensemble de critères a pour but de permettre la transposition du modèle sans qu'il soit nécessaire de le calibrer à partir des débits observés. Néanmoins le modèle devra être validé et il faudra donc disposer de données d'entrée et sortie adéquates. Ceci signifie qu'à côté de programmes expérimentaux destinés à l'étude des processus pertinents pour la démarche analytique (voir infra section 3.4), il faudra également développer un programme d'inventaire des données disponibles sur la zone de travail, de constitution de banque de données et enfin, le cas échéant de mise à niveau des systèmes existant de mesure et d'acquisition de données.

Une fois le niveau de modélisation identifié (résultant de certaines hypothèses à vérifier sur les processus et de la disponibilité des données pertinentes), on étudiera le comportement du modèle pour différents domaines d'intégration spatiale et temporelle afin d'évaluer les intervalles de confiance des prédictions qui en sont issues. On en déduira la validité temporelle du schéma proposé et sa compatibilité avec les objectifs hydrologiques ou climatiques fixés au départ.

### **3.4 Approche analytique**

Dans l'approche analytique, on identifie un niveau primaire de modélisation. Par intégration sur des "Grandes Unités Hydrologiques" (GUH), on en déduit des lois régionales qui, comme dans l'approche globale, servent de base à la modélisation secondaire, c'est-à-dire celle utilisée au niveau d'une maille de MCG ou d'un bassin s'étalant sur plusieurs GUH. Le choix du niveau primaire doit être fait en fonction des trois contraintes citées au paragraphe 1.3 du chapitre 2. La modélisation primaire doit suivre les mêmes principes que ceux définis précédemment dans l'approche globale, pour les modèles applicables aux GUH.

Cette approche présente deux intérêts majeurs: par simulation sur des milieux réels ou fictifs, elle permet la conceptualisation des lois régionales; sur un milieu bien défini, elle permet d'envisager la calibration de lois régionales à partir d'observations à l'échelle d'un élément primaire.

### Conceptualisation des lois régionales

Admettre qu'il est possible de définir des lois régionales revient à admettre que l'espérance spatio-temporelle des différents termes du bilan peut s'exprimer par la somme d'un terme déterministe (la loi régionale) et d'un résidu aléatoire, d'espérance nulle, et dont la variance tend vers zéro lorsque croît le domaine d'intégration. Quelque soit l'approche choisie, il ne suffit pas d'exprimer ces lois mais il faut encore définir leurs domaines de validité (à partir d'une analyse du résidu). Dans l'approche globale, démarche de type 'essais/erreurs', cela ne peut se faire qu'en confrontant des résultats à des observations. Celles-ci sont liées à un type de climat et à un certain type d'environnement. Il sera donc très difficile de prouver que ces lois sont extrapolables. L'approche analytique offre, elle, des perspectives beaucoup plus grandes.

Supposons, par exemple, que l'on ait mis au point une modélisation primaire satisfaisante, à partir d'observations. Plutôt que de déduire par simple analogie la loi régionale, il paraît bien plus satisfaisant de le faire à partir de résultats de simulation sur un agencement même schématique d'éléments primaires en faisant varier à loisir les champs des entrées, et de certaines caractéristiques du milieu (la végétation). Les données ainsi simulées remplaceraient les données expérimentales impossibles à obtenir. Elle seraient ensuite analysées dans le but de préciser les lois régionales (adimensionnelles?) sous une forme paramétrique, et de définir leurs domaines de validité. L'utilisation de ces lois sur un milieu naturel nécessiterait bien entendu une phase de calibration à l'échelle régionale.

Cet exemple est un peu caricatural. Il est évident que l'utilisation des résultats de telles simulations seront d'autant plus exploitables que le milieu sera convenablement décrit (Cf. 3.5.2), que les entrées seront réalistes (Cf. 3.5.1) et que les interactions entre les éléments primaires seront bien pris en compte.

### Calibration

Pour un milieu parfaitement défini, la méthode précédente permettra théoriquement de toujours définir la loi régionale et son domaine de validité. On suppose cependant qu'il sera possible de l'exprimer sous une forme mathématique relativement simple dont les paramètres seront des combinaisons de ceux de la modélisation primaire et de ceux caractérisant le milieu. On suppose également que celle-ci aura, dans les limites définies par les simulations, une certaine universalité.

Selon cette hypothèse, la démarche analytique permettrait donc de déduire les paramètres du modèle régional, d'une part à partir d'une description appropriée du milieu, et d'autre part de la calibration du modèle primaire sur un nombre suffisant d'éléments.

## 3.5 Directions de recherche

On va indiquer ici quelques directions de recherche communes aux deux approches, dans la mesure où elles touchent essentiellement à la conceptualisation des processus, indépendamment de l'échelle adoptée pour cette conceptualisation.

### 3.5.1 Sur les entrées

En provenance de l'atmosphère, la seule entrée directe d'un système hydrologique continental est la lame d'eau précipitée. Le forçage atmosphérique

par effets radiatifs, apport advectifs, voire par les aérosols joue également un rôle incontestable dans le bilan hydrique. On se concentrera cependant ici sur l'entrée pluviométrique, et ce pour plusieurs raisons:

- la variabilité spatiale du champ radiatif incident est bien moindre que celle des champs pluviométriques;
- l'analyse des transferts advectifs liés aux champs de vent et d'humidité est de la compétence des atmosphériciens et non de celle des hydrologues;
- si une bonne connaissance des deux points précédents est nécessaire au calcul du bilan radiatif et donc de l'ETR (un domaine crucial pour la modélisation du bilan hydrique) nous ne disposons pas des éléments de connaissance pour en discuter ici; il est clair cependant que la participation de spécialistes de cette question est indispensable à la cohérence de toute recherche sur le bilan hydrologique à l'échelle régionale.

Concernant les précipitations on dispose d'un cadre conceptuel pour analyser les précipitations convectives tropicales, qui a été présenté en section 3.2. Dans une optique régionale la première étape, déjà décrite en section 3.3 à propos de l'approche globale, est d'identifier des zones climatiquement "homogènes". Pour une région donnée il s'agira alors de caractériser la taille et la distribution dans l'espace (densité, distances) des cellules et des clusters, ainsi que la distribution des intensités à l'intérieur de la cellule et l'évolution temporelle (cycle de vie des cellules, déplacement des clusters, durée de vie des SCM). La connaissance de ces distributions (ou plutôt leur modélisation) permettrait de procéder à une **estimation statistique du champ de pluie, soit par intégration à partir de mesures ponctuelles, soit par désagrégation à partir de mesures globales (satellites)**. Un tel modèle répondrait ainsi à plusieurs besoins :

- \* disposer d'un outil d'intégration de données en provenance de différents capteurs;
- \* fournir des champs de pluie cohérents entre modélisation globale et modélisation élémentaire;
- \* permettre une application à un ensemble régional quelque soit le jeu de données disponible, sous condition d'un degré de précision fixé au préalable pour l'estimation des entrées;
- \* fournir des éléments sur le degré de finesse avec lequel doit être spatialisé le milieu.

En anticipant sur la section 4 où sont décrites les actions que pourraient mener l'ORSTOM dans ce domaine, il faut remarquer que les dispositifs de mesure opérationnels en zone tropicale, hydrologiques ou météorologiques, ne fournissent pas de données pertinentes sur les cellules et les clusters des SCM. **L'approche proposée requiert donc de mettre sur pied des dispositifs de mesure spécifiques.** Les expériences EPSAT-NIGER et ARCOL, outre qu'elles ont fourni des données adéquates pour le Sahel, ont également permis de mieux cerner ce que sera le "cahier des charges" de l'expérience à mettre sur pied lorsqu'une région climatique aura été identifiée pour mettre en oeuvre le programme présenté ici. Une des limitations de EPSAT-NIGER réside dans la couverture spatiale du réseau sol qui n'était pas assez étendu pour instrumenter l'ensemble d'un SCM. Les données radar doivent *en principe* (le traitement conjoint des données sol et radar n'est pas assez avancé pour être catégorique sur ce point) suppléer à cette lacune. Des recherches approfondies dans ce domaine apparaissent donc comme indispensables pour notre programme. D'une façon plus générale les aspects météorologiques et expérimentaux doivent faire l'objet d'une réflexion approfondie dès maintenant.

### 3.5.2 Sur le milieu

D'une manière analogue à ce qui a été vu pour les précipitations, la définition d'une démarche présuppose des hypothèses sur la structure du phénomène à modéliser: modelé/relief, sols, végétation. Chacune de ces trois composantes doit être prise en compte en fonction de son rôle dominant dans le bilan hydrologique.

#### i) Le relief

C'est un élément stable dans le temps, dont l'action est essentielle dans la production du ruissellement et dans son transfert. La caractérisation du milieu devra donc viser à identifier la distribution dans le paysage d'unités élémentaires selon des méthodes semblables à celles utilisées pour les précipitations (on observe d'ailleurs dans la littérature hydrologique actuelle un certain parallélisme entre la description fractale du relief et celle des agents atmosphériques tels que les pluies, les nuages et même les champs de vent). On entrevoit néanmoins que le problème posé est délicat à certains égards:

- \* un versant ne peut être défini que par référence à un réseau de drainage hiérarchisé, ce qui nécessite une analyse préalable de ces réseaux;
- \* ce n'est pas le relief du géomorphologue qui nous intéresse ici, mais un relief "hydrologique" dans la définition duquel la pédologie et la végétation jouent un rôle évident. On ne pourra donc se contenter d'avoir recours à la seule analyse quantitative fournie par les modèles numériques de terrain.

#### ii) Les sols

L'action des sols est capitale dans la production du ruissellement, mais également pour l'ETR puisque les capacités de stockage et les vitesses d'infiltration vont conditionner les quantités d'eau disponibles à un instant donné dans la zone racinaire. Par ailleurs, la répartition des sols est en étroite association avec l'agencement du relief comme le montre la notion de topo séquence. Cette association entre sol et relief doit conduire à identifier des unités élémentaires *plus grandes* que celles résultant d'une analyse séparée de ces deux éléments. Cette intention peut paraître paradoxale: plus on a de critères à croiser, plus grand est le nombre de classes possibles et plus petites les unités de chaque classe. En réalité le fait de se placer dans une optique hydrologique régionale permet de faire abstraction de bon nombre de facteurs de différenciations locales pour ne retenir que la place occupée dans le paysage par un objet "topo pédologique" qui se répète fréquemment et dont la fonction hydrologique peut être étudiée, éventuellement mesurée. On aura un exemple d'un tel objet en pensant à l'association "talus-jupe" de la topo séquence type en milieu sahélien: le sol des talus, caillouteux, est très différent de celui des jupes, composé de sables argileux; sur le plan de la modélisation hydrologique il n'apparaît pas nécessaire (et surtout pas possible dans l'optique de la transposition) d'identifier séparément ces deux unités.

#### iii) La végétation

A la différence des deux éléments précédents, la végétation présente la particularité de pouvoir évoluer rapidement d'une part (dégradation des

forêts par exemple), de présenter un cycle temporel en cours d'année d'autre part<sup>1</sup>.

Le cycle annuel relève de la paramétrisation des variables d'état du système, abordée ci-dessous.

Les changements plus fondamentaux, qu'ils soient brusques comme ceux liés aux incendies, ou résultant d'une évolution lente, du type ajustement à une dérive climatique, doivent pouvoir être testés par le modèle. Ceci est envisageable dès lors que le rôle du couvert végétal est explicité et qu'on peut le faire varier pour représenter une modification durable. A cette fin, des études, que nous ne sommes pas compétents pour détailler à ce stade de la réflexion, seront nécessaires pour mieux représenter les interactions entre les végétaux et le réservoir d'eau dans les sols : profondeurs d'enracinement qui déterminent l'épaisseur du stock "utile", gestion de ce stock par la plante. Il existe des équipes qui travaillent sur la modélisation des systèmes végétaux (production de biomasse, consommations en eau et flux de CO<sub>2</sub>). Ces travaux devraient être assimilés par les hydrologues pour en dériver des modes de représentation au niveau élémentaire du modèle analytique.

### 3.5.3 Sur les variables d'état et de sortie du système hydrologique

Il existe dans tout système modélisé des variables qui caractérisent l'état évolutif de ce système à un instant donné. C'est l'actualisation de ces variables à chaque pas de temps de calcul (le niveau d'un réservoir par exemple) qui permet de produire les résultats escomptés (variable de sortie). On doit donc distinguer ces variables d'état de la paramétrisation du milieu telle qu'elle a été discutée ci-dessus, le milieu étant invariant (la taille d'un réservoir par exemple) pour un run donné du modèle. La paramétrisation des entrées d'une part, celle du milieu d'autre part, et celle des variables d'état d'un troisième côté sont indépendantes les unes des autres, en ce sens que si l'on change l'une, l'autre n'est pas mathématiquement affectée. Par contre variables d'état et de sortie forment un ensemble puisque toute modification de la paramétrisation d'une variable d'état se traduira normalement par celle de la variable de sortie.

Dans un système hydrologique, on peut identifier deux variables d'état principales : l'humidité du sol et la végétation. La première représente la réaction rapide du système au forçage atmosphérique (redistribution de l'eau après une pluie), et l'autre représente la réaction de déstockage, plus étalée dans le temps. Bien que végétation et humidité du sol soient en étroite relation, leur rôle respectif doivent être identifiés séparément dans les modèles pour tenir compte du cycle de la végétation qui peut évoluer indépendamment des caractéristiques hydrodynamiques des sols. Dans les modèles existants cet aspect est particulièrement faible, voire non traité. Il semble donc que ce soit une direction de recherche majeure dans la perspective d'une modélisation globale du cycle hydrologique.

Par ailleurs les variations d'humidité dans le sol doivent être spatialisées pour rendre compte de la diversité de réaction du milieu : on doit supposer à ce stade que la description du milieu s'est faite précisément dans cette perspective. Sur une unité élémentaire du milieu l'humidité du sol est homogène ou obéit à une règle de distribution simple du type de celle proposée par Entekhabi et Eagleson. A ce niveau élémentaire on doit "produire" une ETR, un ruissellement et une

<sup>1</sup> Certes les sols peuvent évoluer, ou subir les effets de l'érosion, mais les échelles de temps concernées sont bien plus importantes que pour la végétation.

infiltration profonde. La production du ruissellement résulte directement de la gestion de l'infiltration à partir de la surface. Excepté pour les régions où le réseau hydrographique est très dégradé, ce ruissellement est ensuite transféré par additions successives vers les exutoires : c'est le seul processus dont la spatialisation au-delà du versant ne pose guère de problème (en régimes d'écoulements pérennes tout au moins).

Le traitement de l'ETR est un peu l'extrême inverse : sa spatialisation pose de gros problèmes dès qu'on veut dépasser l'échelle de la parcelle. Il n'existe pas, à notre connaissance, de méthodes satisfaisantes de mesure d'une part, de modélisation d'autre part des ETR "spatiales". La spatialisation la plus couramment proposée est une somme pondérée d'ETR calculées par modèles monodimensionnels de type SVAT (Sol Végétation Atmosphère Transfert), ce qui sous-entend des hypothèses très fortes sur la structure de la couche limite et l'homogénéisation des flux de chaleur latente en son sein. Manifestement il s'agit là d'une question centrale à la modélisation hydrologique puisque l'ETR conditionne l'évolution du stock d'eau dans les sols et donc leur capacité à infiltration/ ruissellement lors de la pluie suivante. Actuellement l'approche préconisée par les spécialistes du domaine est d'étudier ces effets d'intégration par la biais de la télédétection (la température de surface étant un étant un indicateur du fonctionnement du couvert végétal), par les mesures aéroportées d'autre part (instrumentation directe de la couche limite à plusieurs niveaux permettant de déduire des flux "régionaux"). Un tel domaine ne peut donc être abordé que par l'association de moyens expérimentaux lourds (mesures au sol et éventuellement aéroportés) et le développement de méthodologies d'utilisation des données spatialisées (directes/ avions ou télédéteectées/ satellite). Dans les deux cas la caractérisation préalable du milieu est indispensable (définir des régions homogènes et des unités élémentaires représentatives que l'on peut instrumenter et dont la combinaison permet effectivement de restituer le paysage).

La gestion des aquifères par le modèle hydrologique constitue un autre domaine d'investigation important. Selon l'utilisation de ces aquifères et leur couplage avec le milieu de surface (rivières - végétation), on pourra considérer que leur alimentation correspond à de l'eau perdue pour les interactions continents-atmosphère (au moins localement) ou simplement à une variation de l'état du système (l'aquifère est alors une simple extension du réservoir sol non saturé). Une bonne estimation du niveau des aquifères est également importante pour la gestion de la ressource (rareté de la ressource de surface en zones tropicales autres que la forêt) et pour la modélisation climatique (il faut fermer le bilan et aujourd'hui on évalue ce terme avec des erreurs qui peuvent dépasser 100 %. Parmi les études à entreprendre on mentionnera :

- \* détermination des zones de recharge (ponctuelles ou sur toute l'étendue d'une zone) et de reprise évaporatoire par l'atmosphère;
- \* gestion du drainage profond par le module sol du modèle et des reprises évaporatoires par le module végétation;
- \* suivi d'ensemble du niveau des nappes.

#### **3.5.4 A propos de validation**

La validation constitue l'étape ultime qui donne son sens à tout exercice de modélisation. Cependant il existe parfois une certaine confusion sur ce que recouvre ce terme et sur les différentes étapes qui conduisent à valider un modèle. La validation consiste à comparer les résultats pertinents (au sens des objectifs qu'on a assigné à la modélisation au départ) produits par le modèle avec une réalité extérieure à ce modèle (observations, simulations,..). Dans l'

optique qui est la nôtre ici, on doit distinguer quatre actions différentes qui ont un lien plus ou moins direct avec la validation proprement dite :

- \* des études de diagnostic;
- \* des études de sensibilité;
- \* la phase de calibration;
- \* la phase de validation stricto sensu.

#### i) Les études de diagnostic

Les modèles climatiques produisent directement ou indirectement des sorties qui sont des variables traditionnellement mesurées par les hydrologues (pluies, écoulements). La première phase d'un travail conjoint devrait donc être d'établir un diagnostic de la paramétrisation hydrologique actuelle des modèles climatiques par comparaison entre les pluies calculées et écoulements produits par les MCG d'une part, et ces mêmes variables 'observées' (mesurées ou estimées) à la méso-échelle 'autre part'. Il ne s'agit pas d'une validation directe des sorties des MCG dans la mesure où on ne dispose pas de mesures de pluie sur de telles surfaces et que la comparaison portera surtout sur la climatologie des pluies (moyennes et variances, valeurs extrêmes). En ce qui concerne les débits, les MCG produisent à chaque pas de temps une lame ruisselée qui est 'perdue' pour les pas de temps suivants et qui ne peuvent eux non plus être comparées à une mesure directe équivalente. Par contre il devrait y avoir à l'échelle régionale une cohérence entre le ruissellement globalement produit sur la zone pour une longue période et les débits des grands émissaires hydrologiques. Ces études diagnostiques nous semblent essentielles. En même temps elles ne conditionnent pas directement les recherches que nous nous proposons de mener pour développer d'autres concepts de modélisation régionale. C'est pourquoi elles peuvent apparaître aussi bien dans le scénario 1 que dans le scénario 2 qui sont ébauchés en section 4, sans que leur présence ou leur absence remettent en cause la pertinence de nos propositions. De telles études diagnostiques pourraient être menées en association avec une équipe particulière acceptant de soumettre son MCG à un tel test. On peut envisager également un test plus complet impliquant plusieurs MCG, qui pourrait être proposé comme une action à part entière dans le cadre de GEWEX au niveau national. **Pour mener à bien ces études, il faudra disposer des données adéquates (par exemple grilles de pluies estimées sur une longue durée pour une zone climatique donnée).**

#### ii) Les études de sensibilité

Les études de sensibilité constituent une étape standard de la modélisation. Dans une optique d'analyse des systèmes, il s'agit notamment de vérifier que le modèle dont on cherche à identifier les paramètres dans la phase de calibration n'est pas surparamétrisé ou que cette paramétrisation n'est pas numériquement mal conditionnée. **Ces études sont donc indispensables avant de chercher à valider les modèles conceptuels dont la calibration est le plus souvent entièrement numérique (pas de paramètres physiquement déterminés).**

#### iii) La calibration

La calibration est indissociable de la modélisation. Même une loi physique "élémentaire" comme celle de la chute d'un corps requiert une calibration (la constante d'attraction  $g$  a été originellement calée d'après des observations concomitantes de hauteur et de temps de chute). On remarquera que, dans cet exemple, **l'estimation du paramètre  $g$  ne valide en aucun cas le modèle proposé** et qu'on pourrait en imaginer de beaucoup plus sophistiqués permettant de rendre compte des observations de Newton. La calibration est donc une nécessité commune à toute modélisation. Pour autant il existe des différences significatives entre la calibration d'un modèle conçu directement à l'échelle des résultats souhaités ("l'approche globale") et la calibration d'un modèle résultant

de l'intégration d'une modélisation conceptuelle élaborée à un niveau inférieur ("l'approche analytique").

La calibration d'un modèle conceptuel pose des problèmes bien connus, de type numérique notamment, sur lesquels il n'y a pas lieu de s'étendre ici (ces questions ont été abordés par le programme ERREAU, précurseur du programme ECOULE, présenté en section 4).

La calibration d'un modèle issu de l'approche analytique se présente sous un aspect différent. En effet le modèle final (ou secondaire) est déduit de l'intégration des modèles élémentaires. Cette intégration peut faire apparaître de nouveaux paramètres qui sont des combinaisons des paramètres du modèle de base mais qui peuvent avoir une signification autorisant à les caler directement à l'échelle régionale<sup>2</sup>. Certains paramètres du modèle de départ n'ont plus alors besoin d'être identifiés. On voit ainsi apparaître deux niveaux de calibration : un pour permettre de valider ultérieurement la modélisation effectuée au niveau élémentaire (même si cette validation n'est pas indispensable en termes d'objectifs ultimes, elle est souhaitable pour vérifier la pertinence de l'approche); un autre pour la modélisation secondaire qui va requérir d'autres types de donnée et éventuellement d'autres méthodes.

#### iv) La validation

La validation directe des "produits" de la modélisation hydrologique au niveau des MCG sera très difficile. D'une part l'accès aux données pertinentes est pratiquement impossible; d'autre part on manque de la "profondeur" nécessaire pour valider le climat ainsi reconstitué (c'est-à-dire pour apprécier si les différences produites par le nouveau schéma proposé, qui seront incrémentales, sont significatives sur le plan climatique, par exemple en permettant d'accéder à une fréquence non identifiée dans la paramétrisation précédente).

La seule validation possible, dans l'état actuel des choses, est donc celle de la paramétrisation proposée pour le cycle hydrologique. Cette validation peut-être soit celle des concepts : elle s'effectue alors à l'échelle de la modélisation de ces concepts; soit elle peut s'effectuer à l'échelle des résultats qui nous importent, celle de la maille climatique ou du grand bassin. A cette échelle la validation de tous les termes du bilan est inconcevable, puisqu'on ne peut estimer l'ETR régionale avec une précision suffisante au regard de la part relative des débits par rapport aux évaporations. La validation par les mesures d'écoulement est donc la voie opérationnellement la plus facile à mettre en oeuvre.

Comme pour la calibration, dont elle doit être indépendante tout en lui étant liée, la validation impose des contraintes différentes pour l'approche globale et pour l'approche analytique. La modélisation globale repose sur une stratégie d'essais-erreurs et sa validation nécessite donc un grand nombre de tests pour que sa transposabilité soit considérée comme fiable (elle doit résister au plus grands nombres de falsifications possibles, correspondant à autant de situations naturelles de la zone de travail). La modélisation analytique va être validée à deux niveaux (c'est du moins ce que présuppose sa mise en oeuvre) et cette cohérence nécessaire permet de réduire le nombre de tests (la validation à deux niveaux est beaucoup plus probante que celle à un seul niveau).

A chacune des étapes évoquées ci-dessus des données d'un certain type sont nécessaires. Ce sont ces nécessités, additionnées à celles propres au

---

<sup>2</sup> Par exemple un rapport entre deux paramètres exprimant la variabilité spatiale des pluies d'une part, celle de l'humidité des sols d'autre part. Il s'agira alors de fournir une valeur réaliste de ce rapport, sans pour autant que les 2 paramètres de départ soient estimés.

développement des modèles qui vont permettre de définir une stratégie dans le domaine de la collecte de données.

### 3.6 Observations, données, expériences

Pour mener à bien les différentes études décrites ci-dessus plusieurs types de données et d'observation seront à collecter. Pour tout ce qui touche à l'approche analytique des mesures localement intensives sont nécessaires, en association avec une couverture d'encadrement spatial et temporel incluant des données de télédétection. Ce type de protocole exige le recours à des expériences de terrain relativement lourdes. Elles doivent donc être identifiées comme parties intégrantes du programme dès son lancement. On y reviendra plus loin en section 4.

Pour l'approche globale et pour la validation, on a besoin surtout de données "opérationnelles" ou "standard". Il est difficile de définir a priori ce que sont des données opérationnelles ou standard, mais on peut s'en faire une idée d'après les objectifs de la Veille Météorologique Mondiale. Or ces objectifs sont loin d'être atteints partout, en particulier en Afrique, et on conçoit donc qu'à côté d'expérimentations lourdes et spécifiques, il importera:

- de faire l'inventaire des données disponibles (exercice déjà largement accompli dans le cadre de "Water Assessment" pour l'Afrique de l'Ouest), et de regrouper les données pertinentes dans des banques mises à la disposition des chercheurs du programme;
- de combler le déficit d'informations là où il est le plus criant, soit par des mesures de terrain, soit par un recours plus systématique à des données de télédétection proprement calibrées.

Concevoir une expérience et assurer la continuité et la compatibilité entre les données de cette expérience et les données d'encadrement sera certainement une des principales conditions de la mise en oeuvre d'un programme "GEWEX-Hydrologie Continentale" par la communauté française.

## 4. LES CONTOURS D'UN PROGRAMME

L'ORSTOM "ne pouvant pas partout faire tout et très bien", nous allons essayer de préciser quels pourraient être les contours d'un programme ORSTOM relevant de la problématique exposée jusqu'à présent.

### 4.1. Une zone d'étude prioritaire : l'Afrique de l'Ouest

La définition d'un tel programme nécessite d'abord le choix d'un terrain d'étude de grande extension spatiale, et ce pour deux raisons :

- \* la première est que la validation d'une modélisation à une échelle de l'ordre de 10 000 km<sup>2</sup> ne peut être pertinente que si elle est faite à l'échelle de la centaine de milliers de km<sup>2</sup>;
- \* la seconde est qu'il ne paraît pas réaliste d'espérer trouver des solutions universelles. Les progrès se feront plutôt par des approximations successives, ayant chacune des limites géographiques et climatiques d'applications; ce qui implique une certaine spécialisation géographique des équipes de recherche.

Le choix d'une zone d'étude prioritaire est donc incontournable. Nous pensons que ce doit être l'Afrique de l'Ouest, pour plusieurs raisons<sup>1</sup>:

- a) certains programmes récents menés dans cette partie du monde par l'ORSTOM, seul ou en association, peuvent fournir des données et des résultats essentiels;
- b) il existe une possibilité de collaborer avec des institutions régionales ayant des objectifs voisins ou complémentaires;
- c) l'intérêt que représente l'Afrique intertropicale pour GEWEX;

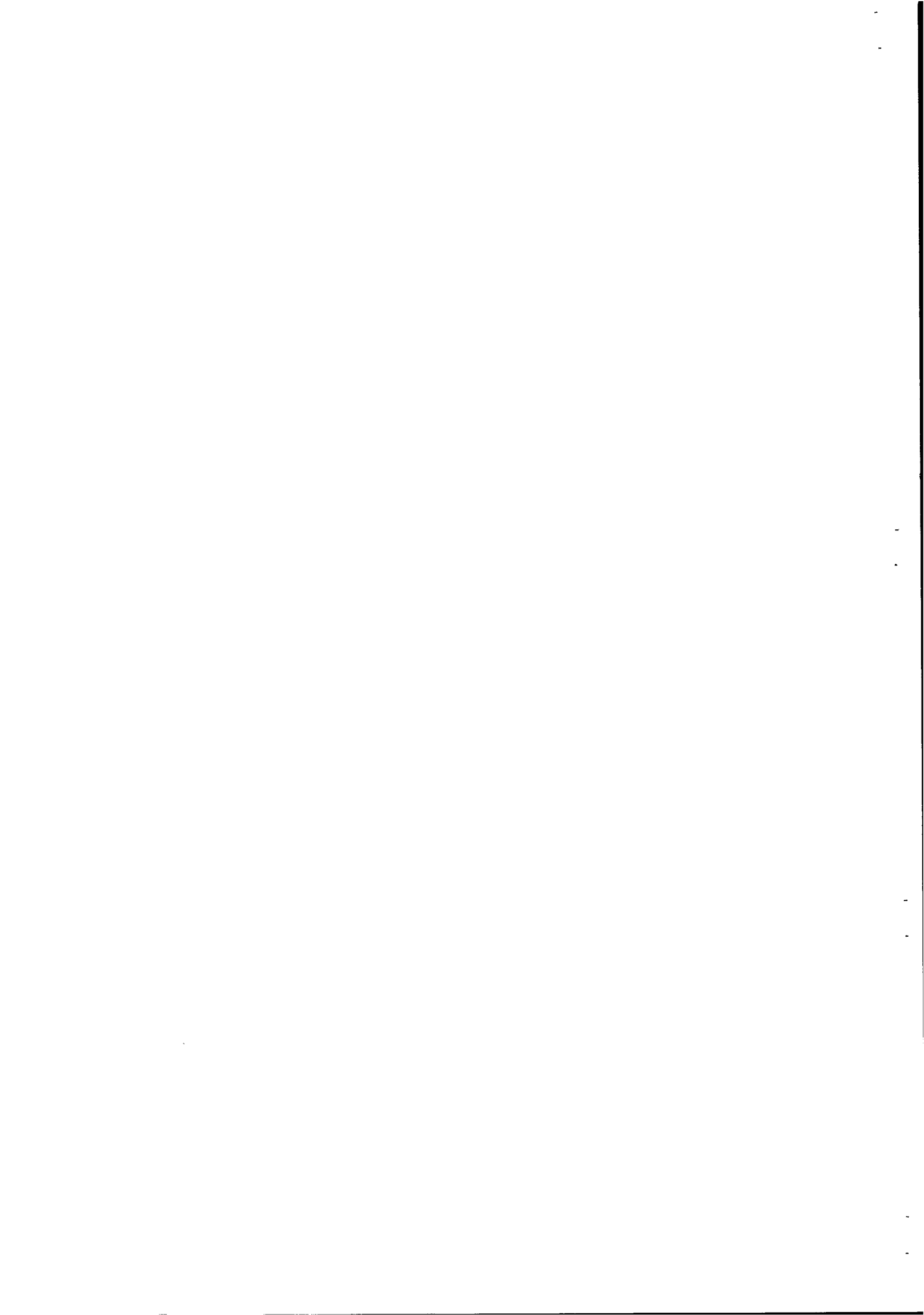
La liste des programmes d'envergure, récents ou en cours, menés en Afrique de l'Ouest par l'ORSTOM est véritablement exceptionnelle. Nous présentons ci-dessous la liste de ceux qui nous semblent les plus pertinents pour notre problématique, sans prétendre qu'ils s'y rattachent directement. Comme on le verra plus loin, certains de ces programmes ont été identifiés comme base constitutive d'une entité de recherche à construire sur la modélisation hydrologique de grande échelle, alors que d'autres doivent être considérées à ce stade de notre prospective, comme des interlocuteurs privilégiés.

#### *4.1.1 Les acquis des expériences récentes*

##### ○ 'HYPERBAV' (zone soudanienne)

Le programme HYPERBAV avait pour buts d'identifier l'ensemble des processus hydrologiques à l'échelle d'un bassin élémentaire et d'en déduire un modèle de fonctionnement. Des observations intensives ont été réalisées, durant quatre ans, sur un bassin de 1,36 km<sup>2</sup> du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Deux des résultats importants sont, d'une part, la mise en évidence du rôle essentiel joué par la morphologie des versants dans la production de l'écoulement, et d'autre part, la possibilité de donner une description d'un bassin qui soit basée sur une typologie des versants. Ces données et ces résultats, rendent cette région de Côte d'Ivoire particulièrement intéressante pour tester la faisabilité de l'approche analytique. Bien que terminé en tant que tel ce programme a débouché sur le programme "versants" mené par l'UR 2B

<sup>1</sup> Nous n'évoquerons pas ici les raisons liées à l'histoire et aux missions de l'institut non pas qu'elles soient mauvaises mais parce qu'elles sont connues de tous.



### ○ EPSAT-NIGER (Sahel)

A permis de récolter 5 ans d'observations des champs spatio-temporels des pluies sahéliennes à partir d'un réseau dense de plus de 100 pluviographes et d'un radar météorologique bande C. L'exploitation de ces données a véritablement démarré en 1993 et fait partie intégrante du programme 'Pluies Ouest Africaines' (voir ci-dessous)

### ○ HAPEX-SAHEL (Sahel)

Trois années d'observations des humidités du sol, des évaporations sur différents couverts végétaux, des écoulements, de la phénologie de la végétation; 3 mois d'observations 'intensives' de ces mêmes facteurs complétées par des mesures atmosphériques et par des observations aéroportées des flux et des humidités du sol; des observations satellitaires et de terrain permettant une description détaillée du milieu. Au sein de l'ORSTOM, plusieurs programmes se sont constitués pour la phase d'exploitation des données, dont trois abordent des questions pertinentes pour une thématique GEWEX (seuls les programmes 'Hydrologie Spatiale HAPEX-SAHEL' et 'Evaluation et Modélisation du Bilan Energétique en Région Sahélienne' sont évoqués ci-dessous; le troisième programme auquel nous faisons allusion est un programme de télédétection mené également au titre de SALT et dont les intervenants ne souhaitent pas apparaître dans une thématique GEWEX).

Remarque : les objectifs affichés par EPSAT-NIGER et HAPEX-SAHEL s'inscrivent exactement dans la problématique présentée précédemment. Il serait dommage et peut-être même incohérent, de se limiter dans l'analyse des données, au seul degré carré de NIAMEY et de ne pas essayer d'extrapoler les résultats à une zone beaucoup plus vaste.

#### 4.1.2 Les programmes en cours

### ○ Le Programme 'Pluies Ouest Africaines'

Ce programme regroupe une équipe de 9 chercheurs et ingénieurs de divers disciplines (Hydrologie, Statistiques, Physique de l'atmosphère, Informatique). Son objectif majeur est, pour l'Afrique de l'Ouest, de bâtir une modélisation des champs spatio-temporels de pluie, qui puisse répondre à la fois aux besoins des modélisateurs du climat et des gestionnaires de la ressource en eau.

Il s'articule autour de quatre volets principaux:

- \* des observations des champs, de l'échelle de la cellule à celle des agrégats. Ces observations ne peuvent se faire qu'au cours d'expériences onéreuses vu le personnel qu'elles mobilisent et les moyens techniques à mettre en oeuvre (radar et réseaux denses de pluviographes). La première expérience a été EPSAT-NIGER. Une autre est projetée en zone Soudanienne.
- \* l'analyse, à partir des données satellitaires, des structures de grande échelle des systèmes convectifs en fonction de la situation atmosphérique.
- \* la modélisation des champs intégrant celles des structures et de leurs agencements.
- \* l'extrapolation à l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, des modèles mis au point sur les données collectées au cours des expériences. Cela ne pourra se faire qu'à partir des chroniques des observations ponctuelles. Ce volet prévoit donc la création d'une banque de données pluviométriques.

Plusieurs projets d'étude pourraient être rattachés à ce programme sans qu'il ait encore été discuté avec leurs auteurs sous quel forme. Ce sont : le programme ICCARE (Côte d'Ivoire), le programme d'étude diagnostique des variations pluviométriques sur la l'Afrique de l'Ouest et Centrale, le programme de recherche dans les séries pluviométriques de cycles liés à des facteurs astronomiques.

### ○ Le Programme 'Hydrologie Spatial' HAPEX-SAHEL'

Ce programme cherche d'une part à spatialiser les termes du bilan hydrologique à une échelle de quelques centaines de kilomètres carrés, d'autre part à mettre en relation de quelques processus dominants à la méso-échelle. Ses objectifs immédiats sont :

- \* le passage de l'échelle locale à la méso-échelle en insistant sur une prise en compte réaliste des processus de surface (végétation, humidité superficielle), permettant de déboucher sur une spatialisation du partage de l'eau de surface et des couches supérieures du sol entre recharge des aquifères et évapotranspiration;
- \* à la méso-échelle, la mise en regard de la variabilité spatiale de la pluviométrie d'une part, de la production végétale et des variations de niveau des aquifères d'autre part, afin d'identifier les échelles de variabilité caractéristiques de ces trois phénomènes et d'aider à les prendre en compte de façon plus performante dans les modèles hydrologiques de grande échelle;
- \* le développement d'un modèle pour l'aquifère du CT3 sur l'ensemble de la rive gauche du Niger, prenant en compte la recharge à partir des mares;

### ○ 'Evaluation et Modélisation du Bilan Energétique en Région Sahélienne'

Il s'agit du programme de l'équipe de bioclimatologie qui a participé à HAPEX-SAHEL et qui va consacrer ses efforts des années à venir à l'exploitation des données recueillies, tout en s'intéressant à d'autres zones semi-arides. La participation de cette équipe à une thématique "GEWEX-BAHC" est indispensable pour la couvrir correctement. Les modalités de cette participation restent à discuter.

### ○ Les programmes 'ERREAU' et 'ECOULEE'

Ces deux programmes ont pour objectif une évaluation régionale, par transposition de modèles hydrologiques globaux, de la ressource en eaux superficielles sur la partie Soudano-Sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. Par leur objectif, leur démarche et la dimension de leur zone d'étude, ces programmes sont très voisins de ceux de 'l'approche globale' de la modélisation hydrologique régionale.

### ○ Le programme 'VERSANTS'

Le programme 'Versants' mené par l'UR 2B sur la zone Soudano-Sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, a pour objectif l'étude du fonctionnement hydrologique des versants. Les résultats de ce programme devraient faciliter la conceptualisation des modèles.

### ○ Les programmes SALT et JACHÈRES

Le programme SAVANE à Long Terme a pour objectif principal l'étude de l'évolution à long terme des savanes africaines en fonction des contraintes climatiques et anthropiques. Cet objectif s'inscrit complètement dans la deuxième problématique présentée au chapitre 2, celle des interactions à long terme entre la surface continentale et le climat.

Le programme JACHÈRES étudie la dynamique des jachères au SAHEL à partir à la fois d'observations locales et d'un suivi de grande échelle par télédétection. Les points de convergence de ce programme avec les problématiques précédentes sont évidents.

#### 4.1.3 Les institutions régionales

### ○ Le CIEH et le PROJET 'FRIEND AOC'

Le Centre Interafricain d'Études Hydrauliques, basé à OUAGADOUGOU, est une organisation qui regroupe plusieurs états d'Afrique Occidentale et Centrale. Sa mission est de favoriser une approche régionale des problèmes liés à l'inventaire, la gestion et l'exploitation des ressources en eaux. C'est donc tout naturellement que le CIEH a été

pressenti pour être la structure coordinatrice du projet 'FRIEND Afrique Occidentale' qui est en train de se monter. Ce projet, en effet, est axé sur la régionalisation des paramètres hydrologiques. L'ORSTOM a été identifié comme en devant être le partenaire scientifique principal. Les objectifs de 'FRIEND' et ceux que nous avons exposés, sont voisins. Le programme 'ECOULEE' a d'ailleurs reçu le label 'FRIEND'; Le programme 'Pluies Ouest Africaines' a proposé (cf. Annexe) que son volet 'banques de données' soit mené en collaboration avec le CIEH dans le cadre de ce projet.

#### ○ Le centre AGRHYMET

Le centre AGRHYMET de NIAMEY est une structure opérationnelle du CILSS<sup>2</sup>. Parmi ses missions, ce centre a celle d'assurer le suivi de la campagne agricole sur l'ensemble des pays du CILSS. Ce suivi n'est possible qu'en faisant appel à la télédétection satellitaire pour l'estimation des pluies comme pour le suivi du développement de la végétation. Une Antenne ORSTOM de télédétection est implantée à l'AGRHYMET. Son activité est actuellement axée sur l'estimation des pluies et, dans le cadre d'HAPEX SAHEL, sur la caractérisation des unités paysagères au sens du fonctionnement hydrologique. Cette antenne pourrait donc être le (un) pôle de télédétection du programme.

#### 4.1.3 L'intérêt pour GEWEX

Les processus de grande échelle sont dans l'ensemble bien décrits par les modèles de circulation atmosphérique. La paramétrisation des processus non résolus par les MCG, notamment le cycle hydrologique continental, est d'un enjeu d'autant plus important que la quantité d'énergie mise en jeu par ceux-ci est grande. Pour ces raisons, l'Afrique intertropicale représente un intérêt tout particulier. C'est en effet la plus grande surface continentale située dans la zone du globe qui reçoit le plus d'énergie.

GEWEX a aussi pour objectif d'évaluer les impacts des fluctuations climatiques que pourrait prévoir à court terme les MCG. Cet aspect de GEWEX est particulièrement important pour les régions du globe connaissant actuellement des situations climatiques critiques. C'est malheureusement le cas pour l'Afrique Soudano-Sahélienne.

#### 4.2. Les choix scientifiques

Le domaine de recherche précisé au chapitre 3, est extrêmement vaste. Pratiquement tous les objets et tous les thèmes de l'hydrologie, au sens le plus large du terme, doivent être abordés à presque toutes les échelles de temps et d'espace. Une problématique cependant transcende toutes les autres, la recherche d'une modélisation hydrologique de grande échelle où les rôles du climat et de la végétation soient explicités en cohérence avec les phénomènes observables à petites échelle. Cet objectif impose une coordination des recherches pour que leur résultats puissent être intégrés.

Si on se réfère au projet GEWEX, l'objectif final est une prise en compte efficace dans les MCG de l'ensemble des interactions entre le climat et les surfaces continentales. Cet objectif ne sera atteint que lorsque l'on sera capable d'une part de paramétriser convenablement le cycle hydrologique dans l'utilisation à court terme des MCG et d'autre part modéliser convenablement les effets à long terme du climat sur le milieu. Il est possible d'identifier des objectifs intermédiaires correspondant à divers niveaux d'intégration. Les choix scientifiques de l'ORSTOM doivent se définir par rapport à ceux-ci.

<sup>2</sup> Comité permanent Inter états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel, regroupant la Mauritanie, le Sénégal, les Îles du cap vert, la Guinée Bissau, le Mali, le Burkina-Faso, le Niger et le Tchad.

Si on ne considère que le volet 'paramétrisation des MCG<sup>3</sup>, la dernière étape sera l'intégration des résultats issues de deux 'filiales' de recherche, celle des précipitations et celle de la modélisation hydrologique régionale (cf. le tableau ci joint). Pour chacune de ces filiales, on peut identifier 3 niveaux d'objectifs, correspondant chacun à une échelle spatiale, et qui sont:

- le niveau 'sous- continental': celui de l'Afrique de l'Ouest dans son ensemble;
- le niveau 'régional': les résultats ne concernent qu'une ou plusieurs régions;
- le niveau 'local': les résultats sont limités aux seuls lieux d'expérimentation.

Pour les deux filiales, nous allons essayer de préciser quels pourraient être les objectifs de l'ORSTOM, compte tenu des programmes en cours. Nous essayerons également d'identifier les 'verrous' à faire sauter pour atteindre tel ou tel objectif. Nous essayerons enfin de déduire de cette analyse différents scénarios possibles.

#### 4.2.1. Filière 'précipitations'

Les objectifs affichés par le programme 'Pluie Ouest Africaines' coïncident exactement avec ceux définis au chapitre 3. Ce programme ne nécessite donc pas d'adaptation particulière. Sa réussite est cependant conditionné à un échantillonnage suffisant des champs Ouest Africains. Dans ce but, il est projeté en collaboration avec le Laboratoire d'Aérodynamique de Toulouse de récupérer un radar mobile 'RONARD' du CRPE, de le remettre à niveau (Coût 1 M.F.) et de l'utiliser dans un premier temps dans l'expérience prévue en zone soudanienne. Le problème à surmonter est essentiellement ici d'ordre financier.

#### 4.2.2 Filière "Modélisation Hydrologique Régional"

Pour la conception d'une modélisation hydrologique régionale, nous avons retenu deux approches, l'une globale l'autre analytique. Bien que complémentaires, ces deux démarches peuvent être suivies de façon séparée et on peut se fixer pour chacune d'entre elles des niveaux d'objectifs différents.

##### a) l'approche globale

Les concepts sont définis a priori (par intuition ou par analogie), on en déduit un modèle secondaire susceptible d'être validé des observations. Si le but, poursuivi est une modélisation intégrée des différents termes du bilan hydrologique, ceux-ci ne sont pas abordés exactement de la même façon pour son élaboration. Les recherches sur l'ETR et l'Eau dans le sol sont essentiellement axées sur la définition de concepts, qu'il n'est pas possible de valider directement; la modélisation des écoulements, en revanche, résulte en grande partie des concepts précédents et constitue leur principale voie de validation<sup>4</sup>.

Dans l'approche globale, les recherches liées à la conceptualisation de l'évaporation et de l'infiltration à l'échelle régionale et celles liées à la modélisation secondaires peuvent être déconnectées. En revanche le choix de cette démarche qui repose sur la validation, implique nécessairement celui de s'investir dans les modèles d'écoulement.

Actuellement à l'ORSTOM, seuls les programmes menés dans le cadre d'HAPPEX-SAHÉL ont pour objectif la définition de concepts (applicables au SAHEL). Les travaux sur l'ETR, l'humidité du sol, les eaux superficielles et souterraines, et la végétation, ont été entrepris précisément dans ce but. En revanche, à notre

<sup>3</sup> Nous ne traiterons pas des interactions à long terme, non pas que le problème ne nous paraisse pas important mais simplement par ce que nous ne nous sentons pas assez compétents pour contribuer de façon pertinente à la définition d'objectifs scientifiques en ce domaine.

<sup>4</sup> Ce qui pose un problème dans les zones semi-arides, où les écoulements sont très faibles. Pour ces régions, la validation devra aussi s'appuyer sur un suivi des nappes souterraines.

connaissance, il n'est pas envisagé de démarche comparable pour les autres régions d'Afrique de l'Ouest.

Les objectifs affichés du programme 'ECOULEE' sont très proches de ceux définis plus haut pour le volet 'validation par les écoulements' de l'approche globale. Ce programme pourrait donc constituer un élément essentiel du dispositif que nous essayons de définir.

La description du milieu nécessaire à l'approche globale doit être cohérente avec la modélisation secondaire. Elle s'appuiera essentiellement sur la vision intégratrice que permettent les satellites et (ou) une analyse du milieu permettant de définir des 'unités paysagère' pertinentes. Nous ne sommes pas capables de préciser quelles sont les forces actuelles de l'ORSTOM en ce domaine. Il est cependant sûr qu'il existe au DEC des compétences dans les principaux outils: Télédétection, SIG et MNT.

#### b) l'approche analytique

L'approche analytique a des ambitions plus grandes. Les concepts de la modélisation secondaire ne résultent plus d'une simple analogie mais sont déduits d'une intégration spatiale d'une modélisation primaire. Cette approche est beaucoup plus exigeante que la précédente dans la mesure où il faut:

- bâtir la modélisation primaire
- en déduire une modélisation du milieu;
- modéliser les éventuelles interactions non additives entre les éléments

primaires.

Les données collectées au cours d'HAPEX-SAHÉL devraient permettre de suivre en partie cette démarche. En partie seulement, car la faiblesse des écoulements limite la possibilité de valider les modèles donc leur extrapolation.

Le choix de cette démarche implique une expérimentation en zone soudanienne de grande envergure pluridisciplinaire (cf. Ch 3). Il faut pouvoir la financer. Il faut aussi être capable de mobiliser les compétences nécessaires. Il faut enfin pouvoir intégrer les résultats des travaux menés dans les différentes disciplines.

Les problèmes à résoudre sont donc multiples:

- 1- Dans les domaines de compétences de l'ORSTOM, les personnels nécessaires ne sont pas forcément mobilisables à cause de leurs programmes en cours et leurs choix scientifiques.
- 2- Certains domaines scientifiques imposés par la démarche n'ont été jamais ou très peu abordés par l'ORSTOM. C'est le cas de la modélisation du relief (et du milieu de façon plus générale), de l'hydrogéologie.
- 3- L'indispensable coordination des recherches, impose que les personnes chargés de les mener appartiennent à une même structure ce qui pose le problème du découpage des UR.
- 4- Le financement de l'expérimentation.

### 4.3. Scénarios possibles de mise en oeuvre

Les actions de recherche requises pour couvrir l'ensemble de la problématique décrite en section 3 ne pourront être mises en oeuvre dans leur totalité dès la naissance du programme proposé. Or on a vu qu'il existe déjà plusieurs programmes ayant des liens plus ou moins étroits avec la thématique GEWEX. Ces programmes sont actuellement dispersés dans plusieurs Unités de Recherche, ce qui ne compromet pas leur existence mais n'est pas favorable à la création d'une dynamique et d'une programmation scientifiques à la hauteur des enjeux énoncés en introduction.

En partant de cette situation actuelle de dispersion on peut envisager deux scénarios principaux, présentant des variantes qu'il est inutile de détailler à ce stade.

Le premier scénario est le maintien du statu quo, imposé par des considérations pas nécessairement scientifiques mais qui peuvent néanmoins peser très lourdement (attache des individus à leur structure d'appartenance actuelle, considérations stratégiques des départements, scepticisme par rapport à l'entreprise proposée...). Les programmes actuels se maintiennent tels quels en nouant des collaborations plus ou moins formalisées au travers des frontières d'UR. Il n'y a pas lieu de modifier profondément ces dernières (tout au moins dans la seule perspective GEWEX). Il n'y a pas lieu non plus de s'attarder sur l'intérêt d'un tel scénario.

Le second scénario mise sur le regroupement d'un nombre suffisant des programmes énumérés en section 4.1.1, permettant d'atteindre un seuil critique à partir duquel la constitution d'une entité de recherche autonome est à la fois crédible scientifiquement et viable sur le plan opérationnel. Une proposition concrète pour un tel regroupement existe, basé sur l'adhésion des quatre premiers programmes de la section 4.1.2. Ce regroupement permettrait de traiter conjointement les questions suivantes :

- \* la description et la caractérisation de la variabilité spatiale des précipitations en zones sahélienne et soudanienne pour toutes les échelles de temps et d'espace pertinentes pour la modélisation hydrologique;
- \* les problèmes méthodologiques liés à l'approche globale, et la validation de certains concepts pour la zone sahélienne d'une part pour la zone soudanienne d'autre part;
- \* la validation de l'approche globale aux échelles régionale et sous-continentale pour la zone soudanienne et la construction d'un modèle d'écoulements où les influences du milieu et du climat seront explicites, dans le double but de valider des paramétrisations hydrologiques des MCG et de faciliter la régionalisation hydrologique.;
- \* la modélisation du bilan d'énergie à l'échelle locale et les problèmes méthodologiques posés par son extension spatiale par télédétection en zone sahélienne (*ceci à confirmer par BM et JPL*)

Un des fondements de ce scénario serait une expérimentation conjointe sur les précipitations (qui fait partie intégrante du programme 'Pluies Ouest Africaines') et sur la composante hydrologique au sens large du terme pour vérifier le degré de réalisme de concepts existants ou pour en définir des nouveaux. **Ce scénario est le minimum requis pour que l'affichage par l'ORSTOM d'une thématique GEWEX soit crédible.**

Ce scénario minimum devrait déboucher sur un programme plus vaste incluant l'approche analytique, s'appuyant sur une expérimentation de grande envergure. Le choix de ce scénario étoffé dépend d'abord de la possibilité de regrouper autour de cet objectif, et au sein de l'ORSTOM, un ensemble de compétences, dans des disciplines classiques de l'institut; mais aussi dans des domaines pour l'instant peu abordés, comme la modélisation du milieu et l'hydrogéologie. C'est une condition sine qua non, dont la satisfaction dépend en grande partie des volontés individuelles des chercheurs susceptibles d'être concernés.

Plus encore que pour que le scénario précédent, il serait alors indispensable que ce programme relève d'une seule structure. Ce programme s'inscrivant dans le long terme, nous pensons que ce doit être une UR.

Ce scénario représente un 'saut' par rapport aux deux autres, en terme de moyens et de structure. Son intérêt scientifique justifie, à nos yeux, que l'ORSTOM accepte ce défi.

**PARAMÉTRISATION DU CYCLE HYDROLOGIQUE DANS LES MCG:  
SCHEMA DES NIVEAUX SUCCESSIFS D'INTÉGRATION DES RÉSULTATS**

**Une Paramétrisation du cycle hydrologique Ouest-Africain dans les MCG**

*Intégration des modèles obtenus dans les deux filières*

Échelle sous-continentale

Échelle régionale

Échelle locale

Méthodes et données

|  |   |                                  |
|--|---|----------------------------------|
| Modélisation des champs spatio-temporels pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest     |   |                                  |
|  |   |                                  |
| Modélisation des relations entre structure des champs et situation atmosphérique     | Modélisation des champs à l'échelle régionale |                                  |
| Analyse des phénomènes   | Extrapolation des modèles locaux              |                                  |
|  | Caractérisation régimes pluvio. ponctuels     | Modélisation des champs observés |
|  |   |                                  |
| Données météorologiques<br>Données satellitaires<br>Sorties modèles prévision météo. | Banque de données pluvio.                     | Expériences de type EPSAT-Niger  |

**FILIERE 'PRÉCIPITATIONS'**

|   |                                       |  |                             |
|---|---------------------------------------|--|-----------------------------|
| Modélisation hydrologique de grande échelle pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest |                                       |  |                             |
| Extrapolation de la modélisation secondaire; calibration; validation                |                                       |  |                             |
| Modélisation secondaire   |                                       |  |                             |
| <b>Approche globale</b>   |                                       | <b>Approche analytique</b>                 |                             |
| Mise au point des modèles   |                                       | Intégration spatiale des modèles primaires |                             |
| Conceptualisation (SVAT, modèles 1D, ...)   |                                       | Modèles primaires                          | Modélisation du milieu      |
|   |                                       |  |                             |
| Expériences   | Concepts existants; Télédétection SIG | Expériences                                | MNT<br>Télédétection<br>SIG |

**FILIERE 'MODÈLES HYDROLOGIQUES RÉGIONAUX'**

ATTENTION: Cercle de l'ouest

