

DÉTERMINATION DE PAYSAGES HYDROLOGIQUES DE RÉFÉRENCE EN AFRIQUE DE L'OUEST

F./DELCLAUX⁽¹⁾, C./DEPRAETERE⁽²⁾ et J.P. LABORDE⁽³⁾
Benin *Benin*

⁽¹⁾ HSM, UMR 5569, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex1 - e-mail : delclaux@mpl.ird.fr

⁽²⁾ IRD Benin, 01 BP 4414, Cotonou, BENIN - e-mail : ird@bow.intnet.bj

⁽³⁾ UPRESA 6046, Université de Nice

Mots-clés : *hydrologie, paysage, géographie, écologie quantitative, logique floue*

I - INTRODUCTION

Dans le cadre de ce projet, qui a débuté en 1999, on explore la notion de paysages hydrologiques à partir de l'hypothèse suivante : le bilan hydrique d'un bassin-versant (BV) étant fortement dépendant du milieu récepteur, il est possible d'inférer des systèmes hydrologiques à partir de structures paysagères et d'en déduire une modélisation de "paysages hydrologiques".

L'observation visuelle d'un paysage est la première étape de description d'un milieu en révélant sa composition et sa structure. Mais l'information disponible est plus large car le regard de l'expert permet d'associer un fonctionnement à la structure. L'hydrologue peut ainsi déterminer les processus pertinents par l'observation du milieu : cette démarche qualitative, complétée par l'acquisition de données et par la modélisation contribuera à la connaissance du comportement du système en réponse au forçage des variables exogènes. Cette approche se heurte à de nombreux obstacles : qualité des données, choix des concepts de modélisation, aller-retour expérimentation-simulation, propagation des erreurs, représentativité de la zone étudiée. La partie qui nous intéresse ici, à savoir la description et la modélisation de paysages hydrologiques, se situe simultanément (1) à l'amont car les données descriptives du milieu sont nécessaires à la modélisation (2) à l'aval car l'utilisation de données similaires sur d'autres zones peut autoriser -ou non- la transférabilité du modèle.

Dans un premier temps, nous avons abordé le paysage par le biais de la géographie et de l'écologie car ces disciplines ont largement contribué au développement de concepts et d'outils susceptibles d'être utilisés dans une perspective hydrologique. Nous avons ensuite testé une description de paysages basée sur des indicateurs d'hétérogénéité, sur des paysages virtuels, puis sur des BV pour un paramètre, le modelé du relief. Enfin, un travail en cours concerne la propagation des erreurs en analyse spatiale par la mise en oeuvre d'opérateurs flous de classification.

II - MATÉRIELS ET MÉTHODES

Bien que les premiers travaux paysagers en géographie remontent au début du siècle, le concept de paysage est récent : deux courants de recherche se distinguent par leurs méthodes et finalités. Le premier définit le paysage comme une espace subjectif, senti et vécu, et regroupe les travaux d'architectes, de sociologues, de géographes et d'aménageurs. La seconde démarche consacre le paysage comme un objet d'observation scientifique par la combinaison de méthodes qualitatives et quantitatives dans une perspective à mi-chemin entre la géographie et l'écologie. L'école de Besançon, représentée par Brossard et Wieber a, de son côté, repris le concept de géosystème de Bertrand et développé une méthodologie de décryptage du paysage visible en décomposant le système paysage en 3 sous-systèmes : (1) *un sous-système producteur du paysage*, (2) *un sous-système utilisateur*, (3) *un sous-système paysage visible*. Dans cette perspective, mais sur une thématique radicalement différente, Joly définit les éléments d'un paysage climatique où les trois sous-systèmes intègrent les études analytiques du climat, le climat vécu, consommé et modifié par l'homme et les notions d'ambiance climatique.

L'écologie des paysages, quant à elle, est liée à l'étude de la dynamique de communautés biotiques. Les écologues ont étudié les effets de la structure spatiale sur l'équilibre et la compétition entre espèces. Ils ont été ainsi amenés à découper l'espace en unités homogènes, les *patches*, les *corridors* et la *matrice*, et à développer des outils d'analyse quantitative par le calcul d'indices caractérisant la forme, l'agencement et la dispersion de ces éléments les uns par rapport aux autres.

En hydrologie, un paysage est considéré à l'échelle du BV comme un assemblage de zones homogènes par rapport à leur contenu et leur dynamique hydrologique : l'hétérogénéité et la complexité spatiale conduisent à segmenter le BV étudié en sous-unités considérées comme homogènes. A une échelle régionale le paysage est constitué d'un ensemble de BV aux caractéristiques quantifiables et qualitatives, susceptibles de classification, permettant ainsi la définition de critères de représentativité. Cependant, ces méthodes posent problèmes : (1) *effets du seuillage* appliqué aux trop nombreuses classes issues de croisement de couches d'information (2) *expertise qualitative* rarement intégrée (3) *homogénéité des zones* non validée en tant que telle (4) *propagation des erreurs spatiales*.

Une réponse originale à ces problèmes pourrait s'exprimer en terme de "paysages hydrologiques visibles" par une conceptualisation analogue à celle de Joly dans sa définition de paysages climatiques. Pour intéressant qu'il soit, ce travail dépasse largement le cadre de ce projet par la méthodologie et les moyens à mettre en oeuvre. Nous nous sommes donc orientés vers une description cartésienne et quantitative en référence à l'écologie du paysage sous les aspect suivants : la caractérisation de l'homogénéité et le propagation d'erreurs spatiales.

Concernant l'homogénéité, et pour des raisons de disponibilité et de richesse fonctionnelle, nous avons utilisé les programmes développés par Baker et intégrés dans le SIG GRASS, et principalement les modules dédiés aux calculs de texture : celle-ci, prenant en compte l'adjacence locale, est un bon indicateur de l'hétérogénéité spatiale. Plusieurs indices de texture sont calculés à partir d'une matrice de probabilité de co-occurrence $p(i,j)$ où i et j sont les attributs des pixels et m le nombre total d'attributs : (1) *Angular Second Moment* $ASM = \sum_i \sum_j p(i,j)^2$ (2) *Inverse Difference Moment* $IDM = \sum_i \sum_j p(i,j)/(1+(i-j)^2)$ (3) *Contraste* $CON = \sum_i \sum_j (i-j)^2 p(i,j)$ (4) *Entropie* $ENT = -\sum_i \sum_j p(i,j) \ln(p(i,j))$ (5) *Contagion* $CONT = 2 \ln(m) - ENT$

Concernant le traitement des erreurs en analyse spatiale, ce problème est complexe car il doit prendre en compte la qualité de l'attribut et de la position des objets ainsi que le type d'opérateur spatial. Différentes méthodes sont proposées pour résoudre ce problème. La décomposition de l'opérateur spatial en séries de Taylor fournit un cadre analytique au calcul d'erreur dans le cas particulier d'opérations mathématiques continues et différentiables. La méthode de Monte-Carlo est également utilisée : c'est par cette méthode que Burrough et Heuvelink ont montré que l'erreur résultant d'une classification floue était inférieure à celle obtenue avec une classification booléenne. Ayant déjà une expérience en modélisation floue, c'est dans cette direction que nous avons travaillé.

III - RESULTATS ET DISCUSSIONS

Caractérisation de l'homogénéité

Nous avons d'abord testé la sensibilité des indices de texture sur des paysages virtuels, caractérisés par une variable z de variabilité Nord-Sud obéissant à la même contrainte statistique (moyenne=100 et écart-type=20). Trois types de paysages ont été créés : des paysages linéaires, des paysages linéaires bruités et des paysages ondulés (cf. Figure 1). Sur la Figure 2, on constate que les indices subissent des variations plus ou moins grandes selon le type d'hétérogénéité. Dans le cadre linéaire simple, l'ASM est plus sensible que l>IDM par rapport à ce type d'hétérogénéité alors que pour des paysages bruités, ils sont équivalents et proches de zéro. L'indice contraste réagit très fortement aux perturbations locales. La contagion et l'entropie sont plus complexes à déchiffrer : à m constant, elles varient théoriquement en sens contraires, ce qui est vérifié dans le cas des linéaires bruités où m est grand et varie peu. Dans les autres cas, m croît avec l'hétérogénéité et ne permet pas une comparaison réaliste des deux indices. Par la suite nous avons conservé trois des indices de texture : l'ASM en tant qu'indicateur global d'homogénéité, le contraste pour sa capacité à prendre en compte les hétérogénéités locales et l'entropie en tant que fonction décroissante de l'homogénéité. Parmi ces trois, seul le contraste prend en compte la valeur de l'attribut.

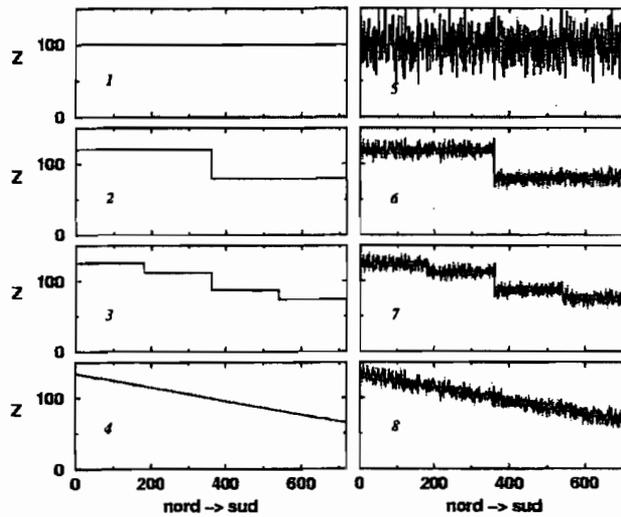


Figure 1. Transects de paysages "linéaires" virtuels de caractéristiques identiques

Nous avons ensuite caractérisé l'homogénéité zonale par ces indices. Les zones considérées sont les BV issus de la base de données environnementales de l'Afrique de l'Ouest du programme CATCH : 475 bassins extraits du MNT 30" de l'USGS, pour des superficies allant de 1,85 million à 100 Km². Dans un premier temps, du fait de la forte interaction eau-relief (la dynamique de l'eau dépend du relief, mais l'eau est également un facteur morphogénique) nous avons choisi un seul paramètre descripteur, le modelé du relief ou Courbure Quadratique Moyenne (CMQ), tel que calculé par Depraetere.

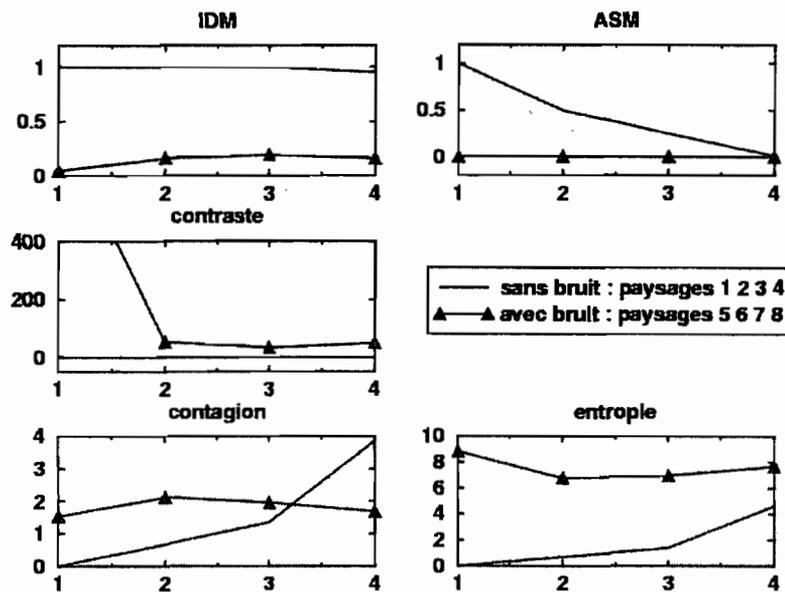


Figure2. Évolution des indices d'hétérogénéité des paysages linéaires sans bruit et avec bruit.

Pour chacun de ces BV, nous avons calculé le modelé moyen et 4 indicateurs normés de variabilité mesurée par l'écart-type, l'ASM, le contraste et l'entropie. La carte de la Figure 3 représente une classification des BV opérée sur la CMQ moyenne. On retrouve les BV au modelé le plus intense situés à proximité des reliefs dominants. Par contre, des BV contigus à des massifs importants (Aïr, Adrar des Iforas) n'apparaissent pas, soit parce que l'effet intégrateur de la moyenne diminue la CMQ du BV, soit parce que le modelé est effectivement moindre : celui-ci est en effet une mesure de l'intensité des reliefs au sens des convexités indépendamment de l'altitude proprement dite.

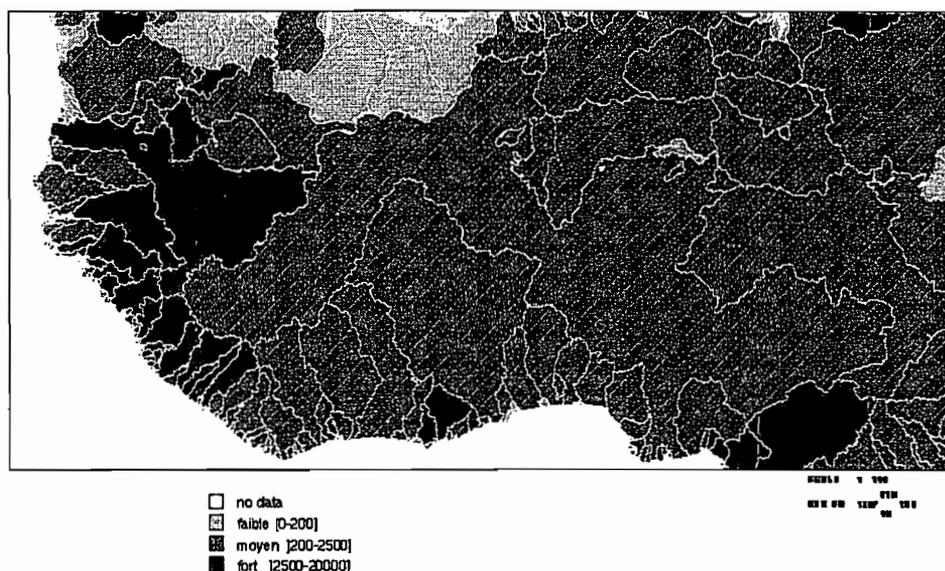


Figure 3. Classification des BV par la CMQ moyenne calculée sur sa surface.

Concernant l'hétérogénéité du modelé, le Tableau 1 révèle des écarts importants dans calcul de celle-ci, notamment dans la classe des fortes hétérogénéités : l'écart de surface cumulée des indices contraste et entropie atteint 52%, soit la moitié de la zone considérée.

Enfin, nous avons croisé les trois cartes d'indices sous l'hypothèse que les zones de CMQ très hétérogène (respectivement très homogène) sont l'intersection des zones où les trois indices caractérisent simultanément une forte hétérogénéité (respectivement homogénéité) et créé ainsi la carte représentée sur la Figure 4. On s'aperçoit qu'avec ce critère, 30% des bassins-versants (5% de la surface continentale) peuvent être considérés comme très homogènes. Les plus importants en surface se situent dans le Nord, zone de faible modelé. Par contre, les bassins-versants hétérogènes sont des BV côtiers, au sud du Fouta Djallon et du Mont Cameroun.

Au delà de l'aspect géomorphologique qui nécessiterait une étude plus approfondie, notamment sur la relation existant entre la valeur du modelé et sa répartition spatiale dans un BV, la notion d'homogénéité spatiale dépend du formalisme choisi, et à ce titre doit être abordée en fonction d'un objectif plus large (prise en compte des contrastes locaux ou des valeurs attributives dans une modélisation, par exemple).

<i>Nbr. BV (% S)</i>	<i>Moyenne CMQ</i>	<i>ECT CMQ</i>	<i>ASM CMQ</i>	<i>Contr. CMQ</i>	<i>Ent. CMQ</i>
faible	177 (6%)	330 (16%)	146 (6%)	414 (39%)	158 (5%)
moyen	221 (68%)	65 (22%)	241 (57%)	29 (39%)	192 (21%)
fort	77 (12%)	80 (48%)	88 (23%)	32 (8%)	125 (60%)

Tableau 1. Classification par valeur croissante des différents indices en nombre de bassins-versants et en pourcentage de surface. La somme des pourcentages des 475 BV est 86%, les 14% restant correspondent à l'océan Atlantique (superficie de la fenêtre géographique : $7.3 \cdot 10^6 \text{ Km}^2$).

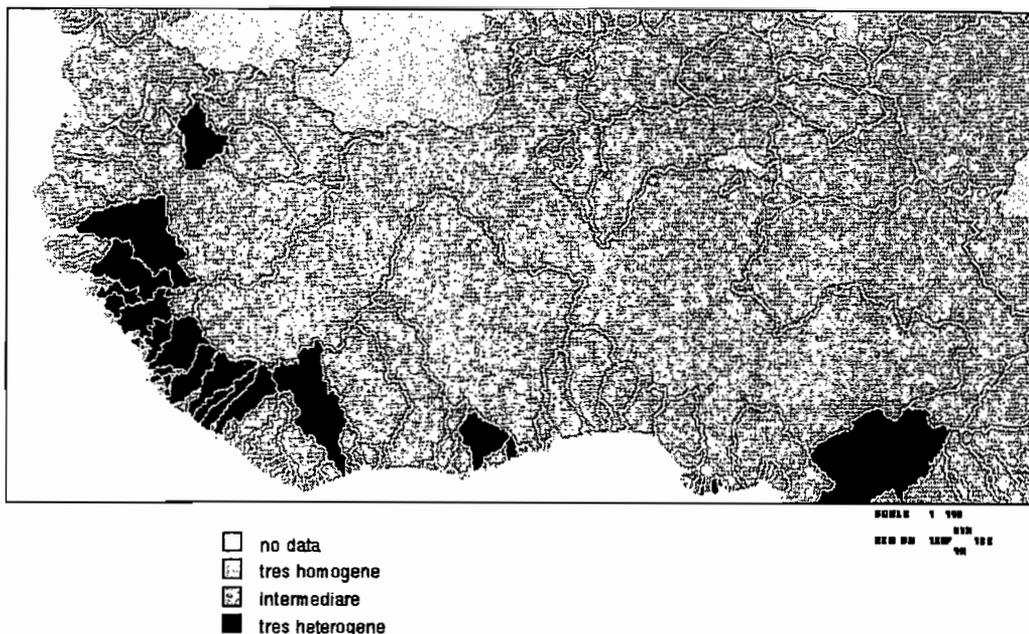


Figure 4. Cartes des zones de forte, moyenne et faible homogénéité. Ces zones occupent respectivement 5%, 74% et 7% de la surface, soit 143, 307 et 25 BV.

Propagation des erreurs spatiales

La Figure 5 illustre ce type de problème : alors que la cartographie du MNT ne révèle pas d'information directe sur les erreurs, la carte du modelé, où interviennent les dérivées du champ d'altitude, fait apparaître la répartition spatiale de l'origine des.

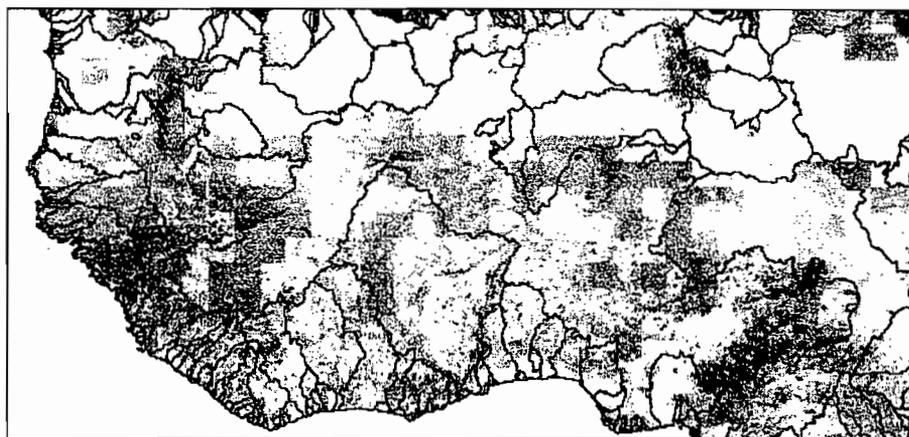


Figure 5. Carte de la Courbure Quadratique Moyenne issue du MNT. Les pavés en gris correspondent à une origine DTED plus précise que les autres données provenant de la base DCW.

La question se pose donc de déterminer quelle est l'erreur obtenue au cours des traitements spatiaux suivants : génération du modelé, calcul du modelé moyen par BV et classification des BV. Ce travail étant actuellement en cours, nous présentons la méthodologie adoptée. A partir d'une carte des écarts quadratiques moyens d'altitude fournie par l'USGS, nous créons n cartes du modelé par traitement de n MNT obtenus par tirage aléatoire. Cet échantillon permet le calcul de n cartes de modelé moyen par BV et n cartes classifiées en hétérogénéité, la classification étant opérée sur les modes booléen et flou. A chaque étape, nous calculons deux cartes, moyenne et écart-type, associées à chaque échantillon. Cette méthode permettra (1) de comparer, pour chaque BV, la dispersion du modelé due aux erreurs avec celle liée à sa variabilité spatiale (2) de tester la validité de l'hypothèse selon laquelle l'inférence floue minimise les erreurs.

IV - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En hydrologie, les notions de zones homogènes et représentatives sont rarement validées en tant que telles par des opérateurs spatiaux, alors que les disciplines comme la géographie et l'écologie ont élaboré des réflexions théoriques et méthodologiques pouvant apporter une réponse à ce questions. Si l'application des concepts issus de la géographie sont délicats à mettre en oeuvre, l'écologie quantitative permet de répondre à certain nombre de questions. Ainsi les indices de texture tels que ASM, contraste et entropie permettent-ils

de décrire l'hétérogénéité d'une zone alors que l'écart-type ne prend pas en compte l'adjacence. Cependant les résultats parfois très différents obtenus par ces indices nécessitent des critères de choix : local (contraste) ou global (ASM), purement spatial (ASM, entropie) ou attributaire (contraste). A ce niveau, le choix de l'indice sera le résultat de l'expertise de l'hydrologue et de la connaissance des processus.

Notre analyse s'est arrêtée à un niveau élémentaire : une seule variable descriptive du milieu, le modelé. Une étude plus poussée du relief d'Afrique de l'Ouest serait nécessaire, de même que la prise en compte d'autres facteurs, tels que l'intensité du relief (écart maximal des altitudes au voisinage d'un point), la superficie et la forme des BV. Cette démarche peut alors conduire à caractériser réellement, du moins au niveau de la géomorphologie, la notion de représentativité de BV. Enfin l'étape finale serait un travail identique à partir des autres données environnementales, climat, sols et occupation des sols et végétation.

L'information spatialisée prend une place croissante dans la modélisation hydrologique. Il faut donc pouvoir tester la sensibilité du modèle par rapport aux données géographiques, ce qui nécessite la connaissance des erreurs liées aux méta-données spatialisées en entrée. La méthodologie choisie, la classification floue pour minimiser la propagation des erreurs spatiales est une réponse, mais doit être validée. C'est le travail qui sera effectué prochainement.

Enfin, au delà de ce cas particulier et très méthodologique sur l'Afrique de l'Ouest, nous mettrons ces méthodes en oeuvre sur le Kori de Dantiandou (région de Niamey) où un travail de segmentation de l'espace en BV est en cours dans une perspective de modélisation hydrologique régionale.

V - RÉFÉRENCES

- B. AMBROISE, 1994. Du BVRE, bassin versant représentatif et expérimental au BVR, bassin versant de recherche, *Actes du Séminaire National Hydrosystèmes, Paris*, 11-24
- A. BARDOSSY et L. DUCKSTEIN, 1995. Fuzzy rule-based modeling with applications to geophysical biological and engineering systems, CRC Press, 232p.
- G. BERTRAND et O. DOLLFUS, 1973. Le paysage et son concept. *L'Espace Géographique*, 3 : 161-164.
- T. BROSSARD et J.C. WIEBER, 1984. Le paysage: trois définitions, un mode d'analyse et de cartographie. *L'espace Géographique*, 1 : 5-12.
- P.A. BURROUGH et G.B.M. HEUVELINK, 1992. The sensitivity of boolean and continuous (fuzzy) logical modelling to uncertain data. *Proceedings of the third European Conference and Exhibition on GIS, EGIS'92, Munich*, 1032-1041
- F. DELCLAUX et J.M. LAMACHERE, 1996. Hydrologie et modélisation à base de règles floues. *Actes du congrès CNRS Environnement, Vie et Sociétés, Paris*.
- C. DEPRAETERE, 1992. Demiurge : Chaîne de Production et de Traitement de Modèles Numériques de Terrain. *Collection Logorstom, IRD*.
- M. ESTEVES, 1994. Cartographie d'unités hydrologiques homogènes et modélisation hydrologique, exemple de l'expérience Hapex-Sahel. *Actes des Xèmes Journées Hydrologiques, Montpellier, éd. ORSTOM*, 463-473.
- P.F. FISHER, 1999. Model of uncertainty in spatial data. *Geographical Information Systems : principles and technical issues (Vol. 1)*, Ed. J. Wiley, 191-205.
- G.B.M. HEUVELINK, 1999. Propagation of error in spatial modelling with GIS. *Geographical Information Systems : principles and technical issues (Vol. 1)*, Ed. J. Wiley, 207-217.
- D. JOLY, 1987. Le « paysage climatique » : pour une formulation systémique du climat. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 2:175-184.
- J.Y. LOYER, S. MORIAUD et L. DESCROIX, 1995. Unités de paysage pour l'hydrologie au Nord du Mexique. *Atelier International Télédétection - Ressources en Eau, Montpellier, CEMAGREF/ORSTOM/FAO*, p47
- H.B. MUSICK et H.D. GROVER, 1991. Image textural measures as indices of landscape patterns. Ed. M.G. Turner et R.H. Gardner, *Quantitative methods in Landscape Ecology : The analysis and Interpretation of Landscape Heterogeneity. Springer-Verlag, New-York* : 77-103
- P. VINE, 1995. Apport de la télédétection à l'étude des zones contributives aux écoulements. Cas de la Mare d'Oursi. *Atelier International Télédétection-Ressources en Eau, Montpellier, CEMAGREF/ORSTOM/FAO*.

INSU

BRGM

CEMAGREF

CIRAD

CNES

CNRS/SPI

INRA

IRD

LCPC

METEO FRANCE

Colloque
PNRH 2000

PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE

Centre International de Conférences/METEO-FRANCE
42, avenue Coriolis – 31 057 Toulouse Cedex

16-17 Mai 2000