

# REGIMES HYDROLOGIQUES : DES CONCEPTS ET MODELES RENOUVELES, ADAPTES AU DEVELOPPEMENT DES CONNAISSANCES

*Hocine BENDJOURI (a), Philippe BOIS (b), Pascal BREIL (c), Julie CHARLEUX (d), Gilles GALEA (c), Jean-Michel GRESILLON (b), Pierre HUBERT (a), Pierre JAVELLE (c), Michel LANG (c), Etienne LEBLOIS (c), Hélène/LUBES-NIEL (e), Françoise MANIGUET (f), Guy/OBERLIN (c), Jean-Claude/OLIVRY (e), Christian PUECH (d), Philippe RAMEZ (c), Pierre/RIBSTEIN (a), Eric SAUQUET (c), Eric/SERVAT (e)*

(a) UMR 7619 Sysiphe, UPMC et ENSMP, Paris ; (b) LTHE, INPG et UJF, Grenoble ;  
(c) UR HHLV, Cemagref, Lyon ; (d) UMR TEMO, Cemagref et Engref, Montpellier ;  
(e) IRD-Hydrologie, Montpellier ; (f) ATE, Meyzieu

*Mots-clés : régime hydrologique, modèle de synthèse, dimension temporelle, invariance d'échelle, émergence de régularités*

## **I - INTRODUCTION : pourquoi chercher à modéliser des régimes ?**

En simplifiant, on peut présenter les régimes hydrologiques comme des représentations de caractéristiques  $x_C(d,T)$ , issues de séries chronologiques en temps courant  $x(t)$ ,  $x$  étant une variable hydrologique (écoulement, pluie, concentration, ...),  $C$  symbolisant qu'il a fallu l'extraire des  $x(t)$  pour en Caractériser tel ou tel aspect,  $d$  précisant la durée sur laquelle cette Caractéristique est définie dans  $x(t)$ , et  $T$  symbolisant une métrique probabiliste destinée à objectiver et quantifier le champ des variations possibles des  $x_C(d)$  dans le temps, pour un contexte hydroclimatique précisé.

Par une refondation des concepts de régimes hydrologiques, il est attendu un renouveau de l'intérêt porté par la communauté hydrologique à ces aspects de synthèses de ses connaissances les plus analytiques, ces dernières étant le plus souvent sous la forme de telles chronique de base en  $x(t)$ , observées ou simulées.

De telles synthèses paraissent aujourd'hui nécessaires à divers points de vue :

\* en interne à la discipline hydrologique, par suite du risque (observé presque partout) d'atomisation et de destruction des connaissances, lié à un foisonnement de celles-ci. Induit par un développement de moyens d'analyses de plus en plus fins, un tel foisonnement peut conduire à des acquis qui ne seraient plus suffisamment cadrés. Or une discipline a besoin d'entrer dans un schéma conceptuel d'interprétation et de synthèse (fut-il hypothétique) de ses analyses et connaissances de base, et si possible préparé d'avance (il peut toujours être ensuite adapté).

\* en interfaçages inter-disciplinaires, ainsi que pour le développement des recherches pluri-disciplinaires, incontournables en hydrologie ("les sciences hydrologiques").

\* en interfaçages avec les demandes émanant des opérationnels et de la société.

\* en réponse particulière au point précédent, pour tester la pertinence des connaissances en hydrologie vis à vis du paradigme social de la Gestion Intégrée des Eaux Continentales Et de leurs Milieux (GIECEM).

En empruntant une image à la physico-chimie des constituants de la matière, on peut présenter les recherches sur les régimes comme la tentative des hydrologues pour se doter de leur tableau de Mendéleïev (les régimes), et donc en rechercher les principes qui permettent de le construire d'une manière acceptable par tous, et sans oublier d'y formaliser les principales propriétés attendues de ses divers éléments.

La probable évolution des régimes (influences anthropiques, climatiques, ...), si elle complique un peu cette recherche, la rend encore plus nécessaire : des références, et les moyens de s'y raccrocher, deviennent alors quasi-incontournables.

Le PNRH a dès que possible accueilli cette problématique, et d'autant plus favorablement que la complexité des processus en hydrologie donne aux synthèses un rôle irremplaçable : c'est là qu'on trouve quelques unes des trop rares propriétés émergentes en hydrologie. Le projet 97-PNRH-23 a, entre autre, soutenu le présent travail.

## II - METHODES : intégrer les variations temporelles en modélisant les durées

Préalablement au choix des méthodes hydrologiques, il a fallu choisir une méthode de travail entre les chercheurs et leurs laboratoires, afin de mobiliser et motiver un maximum de participations, s'agissant d'une recherche ayant vocation à proposer des représentations de synthèse aussi largement exploitables que possible. On a donc fait un vaste tour de table, et au-delà des seuls participants motivés initiaux, pour bien confronter les divers points de vue, et ne pas se contenter de la bibliographie, par ailleurs assez indigente en la matière. Un noyau assez large, mais encore très motivé, a tenu de nombreux séminaires internes, puis a soumis ses résultats à l'ensemble de la communauté hydrologique, lors d'un séminaire très ouvert. Malgré les inévitables corollaires d'une telle démarche ouverte (par ex., sélection insuffisante, dont redites), l'objectif a été atteint.

L'ambition principale étant une resensibilisation aux concepts de régimes, la phase actuelle s'est limitée au développement de connaissances sur les régimes d'écoulements ( $x=Q$ ), renvoyant les synthèses sur d'autres variables hydrologiques vers des projets à venir (rappel : connaissances sur les régimes de pluies,  $x=P$ , déjà bien développées, du moins hors reliefs).

L'échelle temporelle étant ici fondamentale (cf début du § I ci-dessus), on y a porté l'essentiel des efforts, sans doute au détriment des variations spatiales, mais pas au détriment de l'échelle spatiale, celle-ci étant assez liée à la temporelle pour ce qui est des comportements des variables hydrologiques  $x(t)$ . Aux échelles saisonnières (de l'année au mois), les concepts de la bibliographie (régimes dits de Pardé étendus) ont semblé toujours valides, sous réserve de les compléter par une régionalisation, c'est à dire par une synthèse spatiale à pouvoir d'interpolation. Aux échelles plus fines (du mois à l'instantané), le groupe de projet était pré-acquis à l'exploitation des concepts dits  $xdF$ , mais il fallait les consolider, et en clarifier la validation. Enfin, diverses contributions étaient nécessaires pour consolider la connaissance de l'ensemble, et ouvrir des pistes vers d'autres concepts, afin de ne pas enfermer les régimes dans les seules approches de Pardé et des  $xdF$ , fussent-elles consolidées et généralisées.

Pour définitivement dépasser l'excès du qualitatif et du subjectif, qui a pu marquer les connaissances passées en régimes, il a été choisi d'asseoir a priori ces régimes sur des modèles, et procédant de la méthodologie universelle de la modélisation. Il ne s'agit bien sûr plus de modèles analytiques simulant/généralisant les connaissances et séries de base, mais de modèles de représentations des connaissances déjà disponibles : on peut dire que l'essentiel des recherches du travail présenté ici a conduit à modéliser le comportement (les variations) des écoulements dans le temps. Comme dans toute modélisation, ils doit y avoir une conception justifiable, des validations indépendantes des éventuels calages de paramètres, et des qualités suffisantes de transportabilité, surtout si les bases physiques sont faibles ou peu mesurables (échelles intermédiaires à larges). C'est d'ailleurs dans cette démarche de modélisation objective qu'on recherchera d'éventuelles propriétés émergentes. A ce titre, l'introduction des durées  $d$  comme variables co-modélisées, base du concept  $xdF$ , a confirmé sa puissance de consolidation (pour la connaissance des  $x$ ).

Plus généralement, et compte tenu de la problématique particulière de l'hydrologie (complexité), on a privilégié les modèles qui servent les problèmes d'échelles spatio-temporelles (sans doute pas en explicatif, mais au moins en plage de validité), les contrôles de cohérences (d'échelles et de bilans, en particulier), et la robustesse (consolidation) plutôt que la sensibilité.

Enfin, faute de disposer à ce jour d'assez de matériaux sur les tendances et dérives, seuls les estimations à base d'outils statistiques (tests de ruptures, etc...) ont été exploités. Mais on verra plus loin que, grâce aux potentialités de régionalisation, et à leur exploitation au titre de l'ergodicité au moins partielle des comportements hydrologiques, des pistes s'entrouvrent pour estimer des régimes en contexte évolutif.

## III - RESULTATS : synthèses en $xdF$ et caractéristiques complémentaires

Les résultats n'ont donc concerné ici que les écoulements ( $x=Q$ ). A noter que les pluies ( $x=P$ ) sont déjà avancées pour la connaissance de leurs  $xdF$  (modèles dits  $IdF$ , en fait des  $PdF$ ).

a) **Modèles de synthèse en  $QdF$  et alter** : Les travaux ont d'abord permis d'ouvrir un débat sur les modèles de synthèse  $xdF$  appliqués aux débits ( $Q$ ) de crues et d'étiages, et débat qui sorte du milieu limité qui les avait initiés. L'essentiel, dans cette démarche, est sans doute la rigueur du choix

des variables à modéliser : durées  $d$  continues, et variable-seuils ( $x$  dépassé, ou non-dépassé : en débits, QCd) sur ces  $d$ . On a ainsi une réelle représentativité de la chronique  $x(t)$ , sur laquelle la modélisation devra "juste" faire preuve de rigueur, mais l'essentiel étant dans cet échantillonnage. Pour faire le joint avec les processus, les variable-volumes (en débits : VCd) sont traitées de la même manière, et la cohérence des deux est vérifiée (en débits : VCd=JQCd). On se contente ici de résumer la démarche et les travaux par la fig. 1, et de renvoyer à la bibliographie produite (liste ci-dessous). On évitera de faire la confusion avec les anciens débits dits classés, dont les courbes ont une forme semblable, mais des valeurs, et une signification, bien différentes.

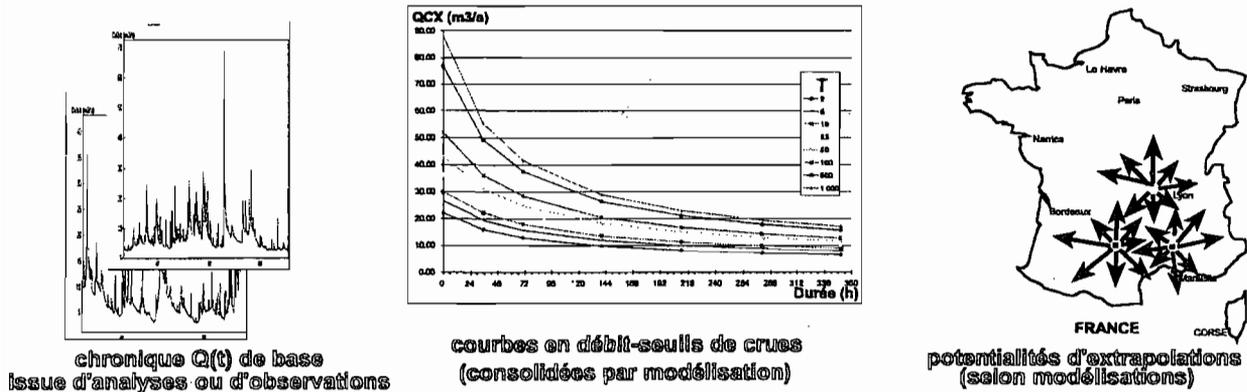


fig. 1 : Passage de la représentation de base  $x(t)$ , à celle en  $xdF$ , et symbole de transportabilité (ici  $x=Q$ ).

A partir de ces courbes de synthèses en valeur-seuils, on peut reconstituer des pseudo-événements symboliques, mais représentatifs des régimes. Ainsi des objets dits HSMF, Hydrogrammes Synthétiques Mono-Fréquence, représentatifs des régimes de crues, et permettant à un modèle hydraulique de propagation de crues en rivières, de recevoir des conditions aux limites (amont, et latérales progressives) bien caractérisées en régimes, par exemple pour la cartographie probabilisée des aléas inondants. Et si l'effet de lissage due à la consolidation (modèle à 3 variables  $x$ ,  $d$  et  $F$ ) n'est pas le bienvenu, il est toujours possible de revenir aux événements  $x(t)$ , dont l'interprétation va être développée, au-delà du seul conjoncturel, grâce à la disponibilité de ces références en régime. On peut formaliser de diverses manières ces comparaisons, et la fig. 2 présente un exemple de ce qui a été développé pour mettre en relation les évolutions des crues de grands fleuves africains avec les irrégularités climatiques.

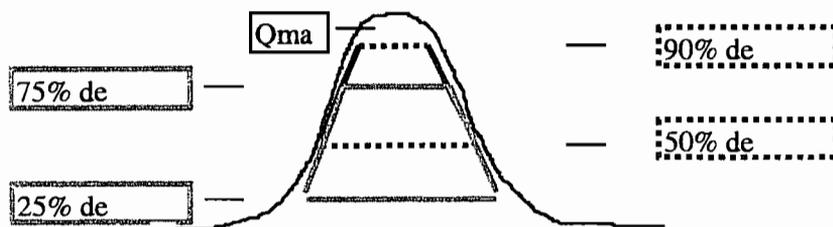


fig. 2 : Conceptualisation de la forme des hydrogrammes, à fin de représentation des régimes d'écoulements et de leurs évolutions.

La modélisation de ces représentations en  $xdF$  a volontairement abandonné une représentation équilibrée entre les trois variables, considérée comme trop académique et inutilement complexe, pour privilégier la représentation en  $F[x(d)]$  du point de vue de l'optimisation de l'étape de la métrique statistique  $F(x)$ , puis la résolution en  $x(d,F)$  du simple point de vue formel de la consolidation (lissage) entre les trois variables. En  $F(x)$  et en crues, les approches sont restées fidèles aux bases exponentielles, mais seulement en direction asymptotique : il suffit qu'il y ait un pseudo-gradex limite  $\partial x/\partial \text{Log}T$ , quand  $T \rightarrow \infty$ ,  $T$  étant l'équivalent dit "période moyenne de retour" de l'estimation fréquentielle  $F$ . En étiage, la métrique "log-normale", tronquée si nécessaire (étiages

nuls), s'est révélée consistante. En modélisation de consolidation (modèle  $x_d^F$  sensu stricto), les étapes ont été structurées, et progressent encore :

- définition a priori, dans les trois variables, des caractéristiques susceptibles de faciliter l'éventuelle régionalisation ultérieure ; ont été choisis (à ce jour, mais évolutions en cours), en crues, les débits de pointe décennaux pour Q et F, et le paramètre dit D de Socose pour d ; en étiages : les débits journaliers biennaux pour Q et F, et l'inverse du classique coefficient de tarissement,  $De=1/\alpha$ .
- formulation en sous-modules emboîtés, pour des optimisations par gradient progressives, avec des fonctions a priori hyperboliques (cadrage linéaire par les asymptotes), sauf si les données apportent la leur (par exemple respect des forme pseudo-exponentielles ou log-normales).
- passage en adimensionnel, possible grâce aux caractéristiques choisies (cf ci-dessus).
- après de très nombreuses validations locales (stations observées, mais aussi quelques simulations Q(P)), des régionalisations ont été tentées, avec une réussite contrastée et donc un distingo fondamental : les modèles adimensionnels se sont révélés très consistants régionalement, jusqu'à inciter à leur rechercher des propriétés émergentes à ambition plus ou moins universelle (fractales et al.), mais la régionalisation des caractéristiques (de redimensionnalisation) reste à ce jour décevante (cf § IV ci-dessous).

**b) Extension et généralisation des caractérisations saisonnières des régimes :** On cite pour mémoire l'extension des approches de Pardé (d'origine : moyennes des valeurs annuelles et mensuelles) aux quantiles, très antérieure à cette recherche, quoique ce projet Régimes ait permis de faire émerger des travaux non publiés appliquant ces concepts de Pardé étendu aux valeurs quasi-journalières : valeurs sur un jour, mais échantillonnées à partir de "saisons" très courtes, de l'ordre de quelques jours (hebdomadaires, par exemple). Mais la principale contribution, à ces larges échelles temporelles, a été cartographique. D'une part, les recherches menées en zone tropicale ont conduit à développer une représentation des conditions hydroclimatologiques des régimes observés, par exemple par décennies. D'autre part, et entre autres dans le but d'interfacer hydrologie (écoulements validés) et météorologie (écoulements simulés en sortie de modèles atmosphériques), on a recherché une représentation plus cohérente des écoulements en continuité amont/aval, tenant compte de la difficulté topologique : hiatus formel entre bassins (dimension 2D et recouvrants) et réseau hydrographique (dimension 1D arborescent), et mauvaise interprétation qui peut en résulter sur l'origine des écoulements de bassins intermédiaires (cf les hypothèses de type Reseda, ou le simplisme des approches dites par différences). S'est ajouté un travail fort intéressant sur la régionalisation (interpolation spatiale) des régimes au sens de Pardé (étendu). La fig. 3 illustre des résultats de ces deux approches complémentaires. A noter que ce volet a été de facto lié au projet PNRH dit Bilans (97-PNRH-15).

**c) Dérives, influences et tendances :** Les caractéristiques climatiques sont largement présentes (pluies et températures annuelles, averses journalières, gradex et pseudo-gradex des fortes pluies, etc...) dans les modèles de régimes (donc PdF et QdF, pour l'instant), et peuvent donc déjà assez aisément "suivre" les évolutions climatiques : le présent projet n'a eu qu'à expliciter et affiner les connaissances déjà développées à ce sujet. Par contre, les influences humaines liées aux modifications des bassins versants et des réseaux hydrographiques, sont encore handicapées par la faiblesse de la modélisation (en régimes) des relations correspondantes : la recherche entreprise a jusqu'à présent été en quasi-échec là-dessus. Quant à la détection des tendances de toutes sortes, hors analyse des causes, elle dispose d'un lot de connaissances convenable et le présent projet s'est contenté de bien les afficher, et entre autres celles développées à l'occasion des sécheresses africaines. Mais hors ces satisfactions ou lacunes, l'émergence citée des propriétés de régularité spatiale (régionalisation) des régimes, même seulement en adimensionnel, redonne à l'hypothèse d'ergodicité relative des comportements hydrologiques une réelle validation. La piste des "régimes analogues" est donc confirmée, et peut autoriser des estimations au moins approximatives de dérives et d'influences.

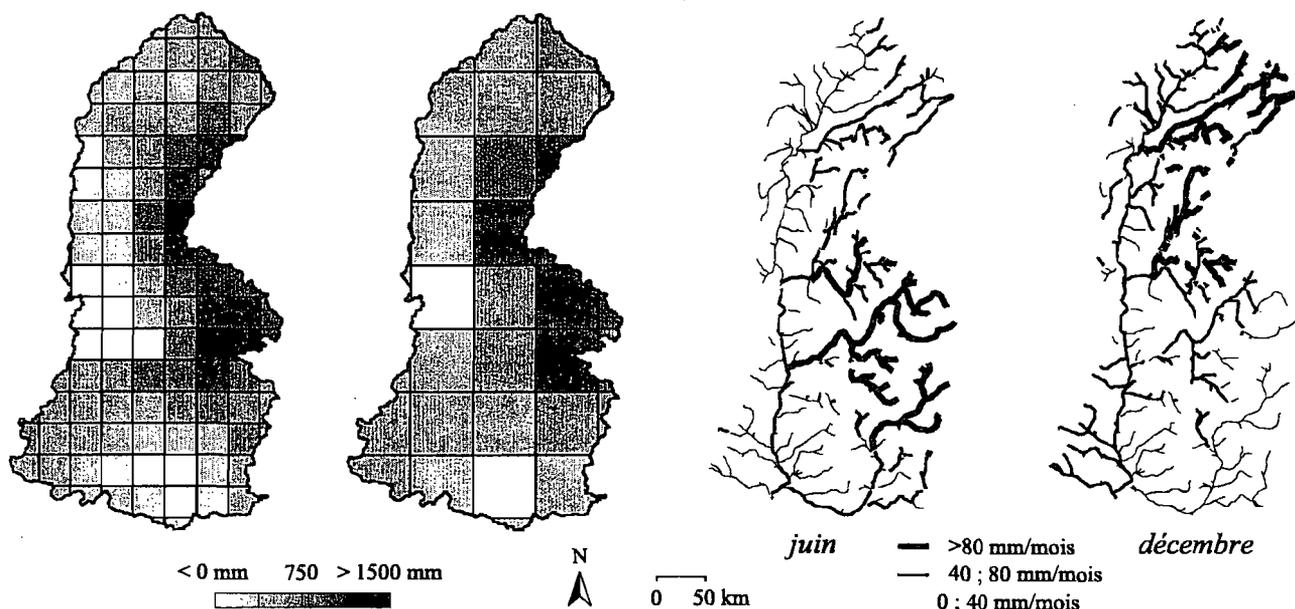


fig. 3 : Cartographies cohérentes, amont/aval, et bassins/réseaux, en régimes d'apports : à gauche, écoulements annuels moyens mQA sous mailles de type modèle atmosphérique, et à droite, écoulements mensuels moyens mQM.

#### IV - CONCLUSIONS et PERSPECTIVES : extensions et compositions

Cette recherche, au-delà du nécessaire tour de table ayant conduit de facto à sélectionner les pistes de recherches les plus fructueuses, et au-delà des développements et des confortements assurés sur tel ou tel aspect de la modélisation des régimes, aura pour la première fois permis d'envisager un continuum structuré entre les caractéristiques les plus synthétiques des régimes (module mQA, par exemple, et sa cartographie à toutes échelles), et les plus détaillées (xdF), en passant par les régime saisonniers de Pardé étendus et généralisés, également cartographies incluses.

Un certain nombre de projets, dont PNRH (par ex 99-PNRH-27), ont été d'ores et déjà initiés via la recherche collective relancée sous l'égide du projet Régimes de 1998-1999. On trouve ensuite dans le compte-rendu des travaux (cf V ci-dessous), nombre de chapitres non traités, mais contenant une esquisse de travaux programmables sinon initiés. On peut citer, entre autres recherches à mener :

- Autour de l'axe, essentiel pour les modèles de régimes, de la dimension temporelle, il faut poursuivre la recherche des invariances d'échelles (ou autres régularités), et en quoi elles peuvent expliquer l'émergence de modèles régionaux adimensionnels pas ou peu variables spatialement. Le projet 99-PNRH-27 a continué d'explorer cette voie. A noter que l'irruption des fractales, qui aboutissent à des lois de comportement asymptotiques algébrique (puissance), pose ici un problème de cohérence avec les formulations pseudo-asymptotiques, fondements du modèle Agrégée (généralisation du Gradex) utilisé pour extrapoler les valeurs rares des écoulements à partir des pluies (et donc utilisé dans les QdF de crues) : à ce jour, le parallélisme à l'infini des lois  $x(T)$  en pluies et en débits n'a été démontré qu'en comportements exponentiels.
- Le continuum cité plus haut est en cours de renforcement : les modèles xdF en crues vont bientôt pouvoir intégrer la caractéristique des apports mQA (module), et les modèles d'étiages intègrent déjà un paramètre de stockage global dans les sols, via le symbolique  $Q_0/\alpha$  des tarissements exponentiels. Le lien se construit donc entre les représentations des régimes d'apports, de crues et d'étiages. Il reste à améliorer la modélisation des opérateurs symboliques de synthèse comme les HSMF et à créer les liens avec les caractéristiques développées pour les régimes tropicaux.
- Même si la large validité spatiale des modèles xdF, au moins en adimensionnel, relativise les différences entre bassins, la composition vers l'aval de régimes différenciés est souvent indispensable (grands bassins, influences des sous-bassins aménagés). Or en régimes, il n'y a pas simple additivité (pour les écoulements) comme en  $x(t)$ , mais composition complexe, et entre variables partiellement et variablement liées. Il y a là urgence à poursuivre les recherches

déjà initiées dans les thèses de M. Margoum (1992) et S. Mousavi (1997), malgré leurs difficultés, entre autres mathématiques.

- Le développement des modèles de synthèse en xdF devrait suivre deux priorités : d'une part, poursuivre avec les autres termes du bilan quantitatif, et d'autre part, aborder les flux de solutés. En bilan, l'ETR, et tout ou partie des réserves des sols, devraient être accessibles, même si leurs séries  $x(t)$  disponibles sont essentiellement issues de simulations (modèles pluies-débits) plutôt que d'expérimentations/observations (rares). En flux, la surdose de complexité induite par les processus biogéochimiques, en sus des quantitatifs (eaux seules), serait plutôt un avantage : en principe, les régularités se développent avec l'augmentation du nombre de processus concernés.
- Deux recherches potentielles posent des problèmes de motivation. D'une part, ces récents développements pousseraient à renouveler la typologie des régimes, mais, en corollaire, les perspectives d'une modélisation de plus en plus complète et continue (de l'année à l'instantané, des apports moyens aux extrêmes), et de plus en plus transportable spatialement et temporellement, démobilisent sur l'intérêt d'une telle typologie, hors son intérêt strictement descriptif et littéraire. D'autre part, les relations régimes/bassin versant, intuitivement essentielles, surtout pour le mécanicien, persistent et signent à "se dérober" au niveau de ces approches de synthèse, et l'on hésite à encourager des chercheurs à s'y (re)perdre ... De récentes pistes de formulation renouvelée des modèles QdF (cf thèse Javelle à venir fin 2000), avec d'autres variables régionalisables que les initiales (cf ci-dessus fin du § III-c), offrent d'éventuelles opportunités de déblocage.

## V - REFERENCES (limitées à publications préparées dans le cadre du projet 97-PNRH-23)

Faute de place ici, il n'y a pas de bibliographie générique : on la trouvera dans les bibliographies des publications listées ci-dessous. Les bibliographies génériques les plus étendues sont celles des chapitres du compte-rendu des travaux menés (Collectif, 1999).

- Cattaneo F., Breil P., Carrel G. et Lamouroux N., 2000. Hydrological regime and cyprinids reproduction success : the lower Rhône at Montelimar, France. *Archiv für hydrobiologie* (soumis début 2000), 27p.
- Charleux J., Javelle P., Puech C., Galéa G. et Grésillon J.-M., 1999: Regionalisation of hydrologic parameters using remotely sensed data". *2<sup>nd</sup> Inter-Regional Conference on Environment-Water. Lausanne/ Switzerland*, September 1-3 1999 / CD-ROM (EPFL), 9 pages.
- Collectif, 1999. Régimes hydrologiques : compte-rendu détaillé des travaux du projet 97-PNRH-23. *Séminaire de Grenoble, janvier 1999*, édition Cemagref Lyon, 140p.
- Galéa G., Mercier G. et Adler M.-J., 1998. Modèles débit-durée-fréquence d'étiages, concept et usage pour une approche régionale des régimes des basses eaux sur la Loire (France) et le Crisu Alb (Roumanie). *Rev. des Sc. de l'Eau*, n°12/1, pp. 93-122.
- Hubert P., Bendjoudi H., Schertzer D. et Lovejoy S., 1999. Approches multifractales de la définition des régimes hydrologiques. MANAUS'99, *International Symposium on Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins* (with special emphasis on the Amazon and others Tropical Basins). *Manaus, Brazil*, 16-19 Nov. 1999.
- Javelle P., Grésillon J.-M. et Galéa G., 1999. Modélisation des courbes débit-durée-fréquence en crues, et invariance d'échelle. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre*, Elsevier, n°329, pp.39-44.
- Oberlin G., Hubert P., 1999. Refondation du concept de régime hydrologique. *Rapport quadriennal du CNFGG*, A.G. UGGI de Birmingham, pp. 269-277.
- Olivry J.-C., Bricquet J.-P. et Mahé G., 1998. Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies. *IAHS Publ.* n°252, pp. 189-198.
- Ouarda T., Lang M., Bobée B., Bernier J. et Bois P., 1999. Synthèse de modèles régionaux d'estimation de crue utilisés en France et au Québec. *Rev. des Sc. de l'Eau*, n°12/1, pp. 155-182.
- Sauquet E., 2000. Cartographie interpolée des régimes d'écoulements de réseaux hydrographiques, prenant en compte la topologie recouvrante de leurs bassins versants. *Thèse INPG Grenoble*, 350 p.
- Sauquet E., Krasovskaia I. et Leblois E., 2000. Mapping mean monthly runoff pattern using EOF analysis. *Hydrology and Earth System Sciences Journal* (accepted ; expected in a Spring 2000 issue).
- Servat E., Paturel J.-E., Kouamé B., Travaglio M., Ouédraogo M., Boyer J.-F., Lubès-Niel H., Fritsch J.-M., Masson J.-M. et Marieu B., 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. *IAHS Publ.* n°252, pp. 323-338.

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