

Ministère de l'Écologie et du Développement Durable

Programme Risque-Inondations 2 (RIO 2)

Prédétermination multifractale des précipitations et des crues

Résumé

Hocine Bendjoudi⁽¹⁾, Agnès Ducharne⁽¹⁾, Pierre Hubert⁽²⁾, Michèle Larchevêque⁽³⁾,
Daniel Schertzer⁽⁴⁾, Ioulia Tchiguirinskaia⁽¹⁾⁽⁵⁾

⁽¹⁾ UMR Sisyphe, Laboratoire de Géologie Appliquée, Université Paris VI

⁽²⁾ UMR Sisyphe, Centre d'informatique Géologique, École des Mines de Paris

⁽³⁾ UMR 7607, Laboratoire de Modélisation en Mécanique, Université Paris VI

⁽⁴⁾ Météo-France et CEREVE, École Nationale des Ponts et Chaussées

⁽⁵⁾ CEREVE Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

Partenariat : METEO-France, Division de la Prévision, Jean-Michel Veysseire

Contact : hocine.bendjoudi@ccr.jussieu.fr ; Tél : 01 44 27 63 26 ; Fax : 01 44 27 51 25

Décembre 2004

Nuages dans le ciel du chott Mérouane, Sahara algérien septentrional (photo H. Bendjoudi)



Les événements extrêmes ont une importance primordiale en hydrologie et leur impact socià-économique est déterminant. Ils représentent des variables clef non seulement pour la prévision des risques et le dimensionnement des ouvrages (digues, ponts, évacuation des eaux) mais aussi pour la gestion des ressources (eau et énergie) et l'occupation des sols.

Le comportement statistique des extrêmes est aussi intéressant au niveau théorique puisque au moins deux types de lois théoriques "universelles" ont été proposées jusqu'ici : exponentielle ou de puissance. Cependant la question n'est pas seulement d'ordre théorique : les conséquences pratiques du choix de la loi théorique des extrêmes sont considérables, car les lois algébriques décroissent nettement plus lentement que les lois à caractère exponentiel habituellement utilisées pour la détermination d'évènements de récurrence donnée, qui seraient alors considérablement sous-estimés.

Notre ambition dans cette étude a été d'aborder la prédétermination des extrêmes en hydrologie en prenant appui sur la physique des phénomènes en jeu, en ne se contentant ni d'une approche purement statistique, ni d'une approche dite « à base physique », ne prenant en compte qu'un nombre limité d'échelles. Notre approche et nos analyses ont au contraire systématiquement pris en compte la large multiplicité d'échelle intervenant dans la génération des extrêmes.

Dans ce cadre, notre approche correspond à considérer que le système précipitations/débits, et en particulier leurs extrêmes, peut être analysé et modélisé comme système ayant un terme source multifractal (les précipitations) sollicitant un milieu lui aussi multifractal (le bassin) et produisant une sortie (le débit de la rivière) ayant aussi cette propriété.

Nous avons d'abord rappelé et illustré que d'une façon très générale les phénomènes de cascades, qui ont souvent été invoqués pour modéliser l'extrême variabilité de la pluie sur de grandes gammes d'échelles spatio-temporelles, conduisent aisément à des lois de puissance pour les queues de lois de probabilité. Ceci est particulièrement bien vérifié pour les précipitations, de nombreuses études concluant sur une telle loi avec un exposant $q_D \approx 3$. Nous avons empiriquement vérifié ce comportement multifractal des précipitations en utilisant la base PRECIP de Météo-France. On doit s'attendre à un comportement du même type pour les maxima d'une série, plus précisément, si les corrélations étaient seulement à courte portée, la loi des extrêmes serait une loi de Fréchet (souvent appelée Log- Gumbel ou encore « Generalized Extreme Value » (GEV) de type 2), avec le même exposant q_D , dont l'inverse $\gamma = 1/q_D$, est le paramètre de forme de la GEV. Nous avons empiriquement montré que la loi de Fréchet est nettement mieux adaptée que la loi de Gumbel pour décrire les extrêmes des précipitations.

Pour étendre cette analyse aux débits, nous nous sommes intéressés aux relations pluies-débits, en posant les premiers jalons d'une approche qui ne se contente pas d'analyser des chroniques de débits à l'exutoire d'un bassin ou à ses quelques points de mesure, en général en nombre très limité. Nous avons au contraire voulu comprendre, analyser et représenter à la fois en espace et en temps les processus qui se déroulent dans un bassin ou même dans une zone hydrologique, en particulier les flux qui traversent la multiplicité des échelles spatio-temporelles en jeu. Ceci nous a amené à considérer les relations entre plusieurs champs multifractals : champs de débits, de débits spécifiques, des aires de drainage, de la pluie et du réseau de mesure lui-même. Ce dernier champ permet, grâce au « théorème multifractal d'intersection » de déduire les propriétés multifractales des autres champs à partir de leurs rares mesures disponibles. Ces propriétés déterminent en retour le comportement de ces champs presque en chaque point de l'espace et presque à tout instant, alors que nous partions d'observations en nombre très limité, en particulier au niveau spatial.

Le cadre de cette approche a d'abord été développé et testé sur la base de données R-Artic Network (débits mensuels), puis appliqué aux données de débits journaliers de 173 stations relativement bien réparties du bassin Rhône Méditerranée Corse. Nous avons mis empiriquement en évidence deux régimes relativement distincts d'invariance d'échelle pour les débits. Un régime « climatologique » pour des périodes plus grandes qu'une année, un régime « météorologique » pour les périodes plus courtes. Pour les précipitations, la transition s'effectue plutôt autour de quelques semaines, ce qui correspond au maximum « synoptique », c'est-à-dire la durée de vie moyenne des structures de tailles planétaires. Ce décalage est une manifestation de l'effet intégrateur des bassins. Une autre manifestation de cet effet est le fait que la multifractalité moyenne climatologique (mesurée par la codimension C_1) est dix fois inférieure à celle du régime météorologique, alors qu'ils ont tous les deux le même degré de multifractalité (mesuré par l'indice de Lévy α). Nous avons discuté l'intérêt et les limites de représenter cet effet intégrateur par une intégration fractionnaire des précipitations. L'intérêt est que nous obtenons aisément à partir d'une chronique de la pluie, une chronique synthétique des débits, qui est visuellement très proche de celles observées. Mais nous avons aussi mis en évidence qu'intervient fréquemment une différence pour les extrêmes : du fait de l'intégration fractionnaire, la chronologie synthétique a le même comportement extrême que celle des précipitations, généralement plus fort que celui des débits observés.

L'effet intégrateur des bassins a donc été étudié plus en détail en analysant sur toute la gamme d'échelle disponible les relations entre débits, débits spécifiques et aires de drainage. Nous avons mis en évidence une plus grande universalité pour les débits spécifiques que pour les débits bruts, c'est-à-dire une forte indépendance des premiers par rapport à la structure des bassins et plus particulièrement par rapport à la distribution des aires de drainage, et une certaine similitude entre débit spécifique et pluie.

Ces propriétés conduisent à une factorisation : la variabilité spatiale des débits est le produit de la variabilité de la réponse du bassin (caractérisée ici par la distribution des aires de drainage) par la variabilité de la pluie. Cette dernière caractéristique explique à la fois la variabilité des q_D observés pour les débits, et qu'ils soient en général différents de ceux des précipitations, car modulés par la distribution des aires de drainage.

Un résultat très pratique de cette analyse a été la mise au point d'un coefficient de risque permettant d'évaluer la forme de la distribution des extrêmes des débits à partir de leur comportement moyen, qui peut être bien estimé sur des périodes relativement courtes. En effet, ce coefficient de risque est calculé à partir des exposants multifractals déterminant le comportement moyen du champ. Nous avons testé cet estimateur sur les données du bassin Rhône Méditerranée Corse et avons obtenu ainsi à partir d'une seule année d'observation une carte de risque très cohérente avec les observations faites sur des périodes beaucoup plus longues.

Beaucoup de travail reste à faire aussi pour faire passer ces résultats dans la réglementation et dans l'ingénierie. Ceci est particulièrement nécessaire à une époque où toutes les sociétés doivent, et plus encore devront, assumer une augmentation objective du risque hydrologique due à une vulnérabilité accrue, que les pratiques passées de l'hydrologie appliquée ont certainement souvent sous-estimée.

Dans ce cadre, une importante perspective a été ouverte, par la mise en place du groupe "Nouveaux aspects théoriques et empiriques des extrêmes en Hydrologie" dont l'objectif est de dépasser le stade actuel, où chaque institution et même secteur institutionnel peut définir ses propres normes, pour le calcul par exemple de la crue centennale. Cet enjeu est complexe et particulièrement important : il s'agit de progresser de manière significative dans le domaine des extrêmes, en mobilisant les approches existantes à la fois en hydrologie et en statistique.