

Observations d'événements extrêmes historiques dans le monde, selon les climats et les réseaux de mesure

Observations of historical extreme hydrological events in the world, with contrasting climates and measurement networks

Eric Sauquet*, Philippe Bois**, Benjamin Renard*

* Cemagref, 3 bis quai Chauveau, CP 220, F-69336 Lyon cedex 09

Tél. : +33 (0)4 72 20 89 13, Fax : +33 (0)4 78 47 78 75, e-mail : eric.sauquet@cemagref.fr

** LTHE (Laboratoire d'Etudes des Transferts en Hydrologie et Environnement) INPG, UJF, CNRS, IRD
BP 53 38041 Grenoble cedex 9

Numerous severe hydro-meteorological events have been observed for centuries. However, a quantitative knowledge of such extreme phenomena has been available for only one or two centuries. Based on observations we display the great variability of heavy rainfall precipitations and extreme discharges in space in terms of magnitude and extent. Basic statistical analyses shows that each hydrological time series has its own characteristics that seem stationary at medium time scale (a few human generations).

Mots clefs : Hydrométéorologie, Précipitations extrêmes, Crues extrêmes, Variabilité spatiale

I ■ INTRODUCTION

Avant d'étudier les crues, il nous paraît important de présenter des résultats concernant les précipitations. Celles-ci sont en effet les causes les plus générales des crues, même si la liaison entre pluie et débit n'est pas simple. En effet, entre les pluies et les débits, une partie souvent importante des précipitations s'infiltré et cette infiltration est fonction de la nature du sol, des pluies et de l'état de saturation avant l'épisode pluvieux. Pour les grands bassins constitués de plusieurs affluents, la concomitance ou non-concomitance des crues des différents affluents jouera souvent un rôle aussi important que les pluies sur la crue résultante.

II ■ LES PRÉCIPITATIONS EXTREMES

Selon Péguy [1989], c'est dans la première moitié du xv^{ème} siècle que la Chine installa un réseau de mesures de précipitations. En Europe, l'invention du pluviomètre est attribuée en 1639 au mathématicien Benedetto Castelli. En France, c'est avec l'inauguration de l'Observatoire de Paris en 1671 que l'on voit apparaître des pluviomètres dans la région pari-

sienne. Ce n'est que vers 1875 que l'on invente le pluviomètre enregistreur que l'on appellera pluviographe par la suite. Si l'on possède quelques longues séries de pluies journalières (plus d'un siècle), les longues séries (plus de 50 ans de pluies à pas de temps fin inférieur à la journée) sont rares.

Rappelons que les précipitations fortes correspondent à diverses situations météorologiques :

- les fronts froids (arrivée d'une masse d'air froid sur une masse d'air chaud) sont moins étendus, occasionnent des précipitations courtes mais intenses (a) ;
- les fronts chauds, arrivée d'une masse d'air chaud sur un air plus froid peuvent donner des pluies longues, étendues mais peu intenses (b) ;
- les deux fronts peuvent se rejoindre pour former des fronts occlus.

Il faut également citer les précipitations convectives, occasionnées par un air chaud instable et humide, qui sont à l'origine de précipitations courtes, peu étendues mais intenses. Nous mentionnerons également les précipitations occasionnées lors du passage des cyclones. A titre d'exemple, le cyclone tropical Firinga qui a frappé de plein fouet la Réunion en janvier 1989, a apporté des cumuls de 250 à 1 250 mm en 24 heures sur l'île.

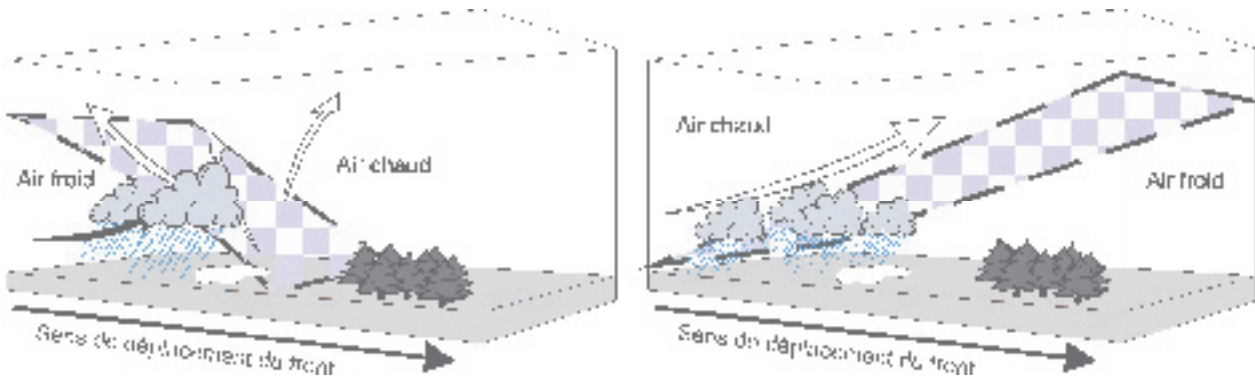


Figure II-1 : Situations météorologiques types, front froid (a) et front chaud (b).

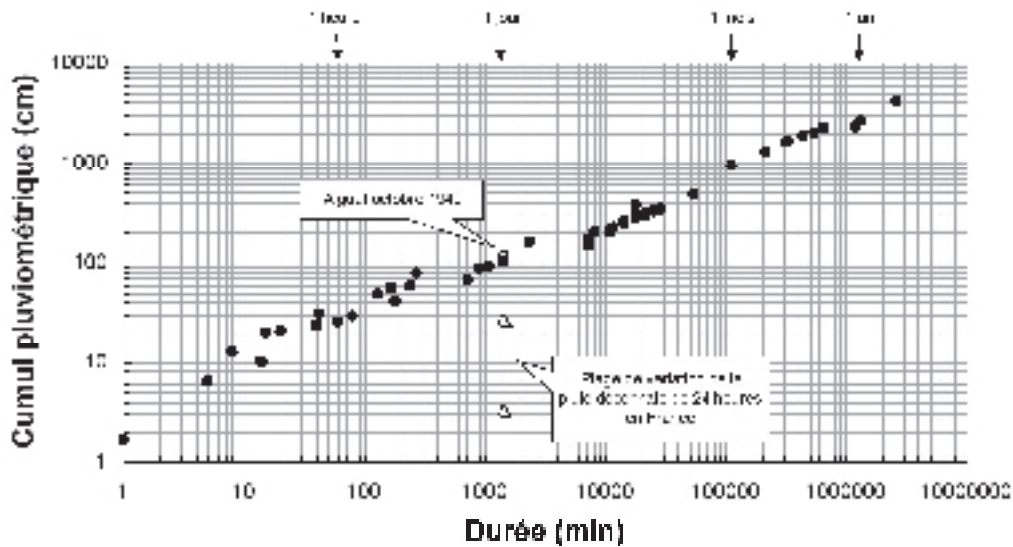


Figure II-2 : Précipitations extrêmes mesurées (d'après Jennings (1950) et données Météo-France).

Il sera bon d'avoir en mémoire cette diversité de configurations hydro-climatiques, lors des études statistiques basées sur des données regroupant souvent des situations contrastées.

● II.1 Examen de précipitations ponctuelles extrêmes

Les données de la figure II-2 ont été observées et publiées il y a déjà plus de 50 ans [Jennings, 1950]. Elles ont été certainement dépassées depuis ; cependant, cette illustration donne une idée non exhaustive des valeurs très fortes de précipitations ponctuelles cumulées sur des pas de temps de quelques minutes à deux ans. Notons que ces pluies n'ont pas toutes la même probabilité et sont de diverses origines météorologiques, selon le pas de temps et la région. Le lecteur peut être surpris par ces valeurs « formidables » : plus de 100 mm en 8 min, 300 mm en 40 min, 900 mm en 18 heures (soit près de quatre fois la pluie décennale de 24 heures en France) et plus de 2 500 mm en 3 jours. Malgré tout, des événements exceptionnels peuvent affecter la France Métropolitaine. Ainsi, lors de l'Aiguat d'octobre 1940, certains secteurs de la Haute Vallée du Tech (Pyrénées Orientales) ont reçu un cumul de l'ordre de 1 200 mm sur une durée de 24 heures.

Il est usuel de résumer graphiquement les statistiques issues d'un échantillon d'observations en traçant la courbe des fréquences cumulées empiriques $FCE(i) = (i-a)/(n+b)$ où i est le

rang de la donnée dans l'ordre croissant et n le nombre de données, avec pour la figure II-3, les valeurs du cas général, $a=0,5$ et $b=0$. Pour des raisons pratiques, l'échelle des abscisses correspond à $u_{\text{Gumbel}} = -\ln(-\ln(FCE))$. Il s'avère que chaque site de mesure a des caractéristiques statistiques propres, qui plus est relativement stables au fil des décennies successives. Ainsi, nous remarquons que la différence entre les représentations des deux sous-périodes de Marseille est infime par rapport à la différence entre celles-ci et celle du poste de Nîmes.

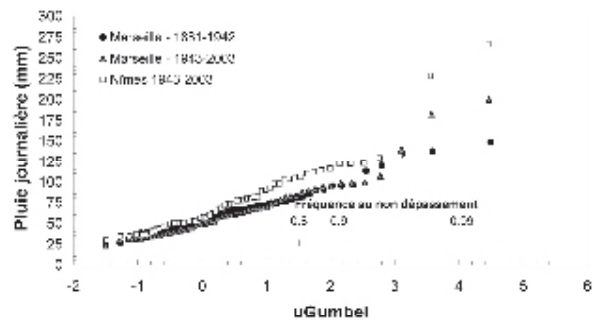


Figure II-3 : Fréquences cumulées empiriques des précipitations journalières maximales annuelles à Marseille scindées en deux sous-périodes 1881-1942 et 1943-2003 et Nîmes 1943-2003.

● II.2 Examen dans l'espace de précipitations extrêmes

Des cartes des caractéristiques statistiques des événements extrêmes observés commencent à voir le jour même pour des faibles pas de temps. La figure II-4 [Bois *et al.*, 1997] montre la bonne cohérence spatiale de ces résultats. Dans ce secteur, les pluies extrêmes varient de la région la plus critique à la moins extrême dans un rapport de 1 à 3 sur un secteur géographique restreint avec des valeurs de pluie sur 6 heures qui peuvent dépasser 220 mm. Il est nécessaire de poursuivre l'effort de synthèse – qui sous entend un traitement homogène des données – pour que d'autres cartes de ce type, avec les incertitudes associées, soient à la disposition des utilisateurs pour les études de risque.

Il est évident que ce sont des pluies ayant une certaine portée dans l'espace, couplées ou non à des phénomènes de fonte ou de saturation des sols, qui vont provoquer les crues. La caractérisation conjointe en durée et fréquence permet donc d'établir le lien avec le comportement de la rivière. Les descriptions d'extension des précipitations avec leurs valeurs en fonction des durées sont rares. En effet, elles requièrent une reconstitution exhaustive des champs de pluie à partir de l'information issue du réseau, opération parfois délicate. Un exemple de traitement nous est donné par la figure II-5. Les courbes obtenues font appel au concept de la Pluie Maximale Probable (PMP). Elles s'appuient sur des quantités observées, semble-t-il, il y a quelques années. Ces abaques fournissent les valeurs maximales probables de pluie moyenne sur une durée continue et sur une zone de taille définie.

En France, des études portant sur la caractérisation spatiale de l'aléa pluviométrique ont déjà été réalisées, notamment en Languedoc-Roussillon [Neppel *et al.*, 1998]. Une approche intégrée de l'analyse statistique des pluies, depuis l'analyse ponctuelle jusqu'à l'analyse spatiale, a été initiée à Marseille par Ramos *et al.* [2005a]. La première opération consiste à rechercher sur le secteur d'étude pour différentes durées et surfaces continues, la valeur de pluie moyenne maximale. Une fréquence de retour est estimée en exploitant un coefficient d'abattement pour établir le lien entre analyses ponctuelles et moyennes spatiales pour chaque épisode. L'ensemble est notamment résumé par un diagramme de sévérité (fig. II-6) [Ramos *et al.*, 2005b].

III ■ LES CRUES

L'hydrologue averti trouvera dans les œuvres de Maurice Pardé (en particulier dans [Pardé, 1961] qui traite de la puissance des crues en diverses parties du monde) et dans [Champion, 1864] une très grande quantité d'informations et d'analyses hydro-météorologiques sur les crues.

● III.1 Valeurs mondiales et françaises

Pour les crues pluviales, compte tenu de la variabilité importante des possibilités de pluies fortes d'une région à l'autre, on constate évidemment une grande variabilité, d'autant plus que la liaison entre les pluies et les crues est rarement linéaire ; il y a souvent un effet de seuil causé par le phénomène d'infiltration.

La figure III-1 représente cinquante-quatre valeurs extrêmes observées dans le monde, tous climats confondus d'après [IASH, 2003], sélectionnées à partir de l'indice de

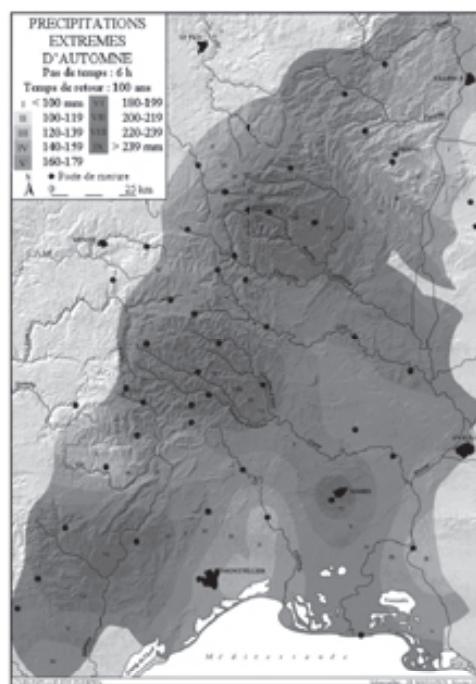


Figure II-4 : Précipitations 6 heures centennales, Cévennes Vivarais.

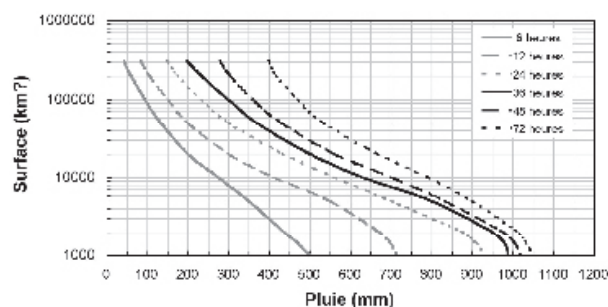


Figure II-5 : Extension spatio-temporelle de la Pluie Maximale Probable au Vietnam d'après [US Weather Bureau, 1970].

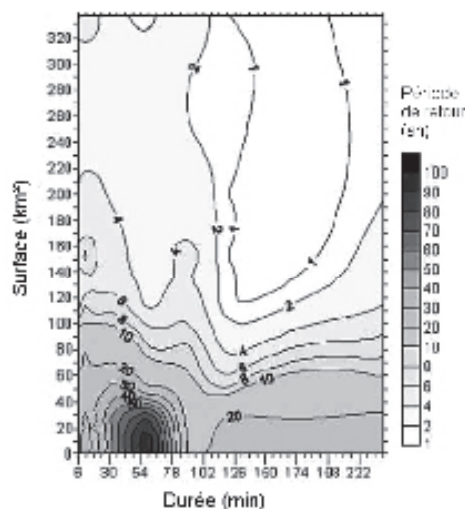


Figure II-6 : Diagramme de sévérité – Episode du 22-23 septembre 1993, Marseille (d'après [Ramos *et al.*, 2005b]).

Franco et Rodier [1967]. Chaque point correspond à une crue référencée en fonction de la surface du bassin versant. Le graphique montre une très grande diversité des comportements hydrologiques ; certes ces crues n'ont pas toutes la même fréquence. Deux formulations pour la courbe enveloppe selon la taille du bassin versant ont été établies :

- $Q_{\max} = 500 S^{0.43}$ si $S \leq 90 \text{ km}^2$
- $Q_{\max} = 100 S^{0.8}$ sinon.

Si un tel comportement se vérifiait à Paris, le débit maximal de la Seine y atteindrait $50\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ soit 20 fois le maximum observé. A titre de référence, nous avons placé le débit maximal de la crue du Rhône de décembre 2003, égal à $11\,500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ valeur définitive établie par le comité d'expert lors de la conférence de consensus de juillet 2005 (<http://ccbr.lyon.cemagref.fr/>).

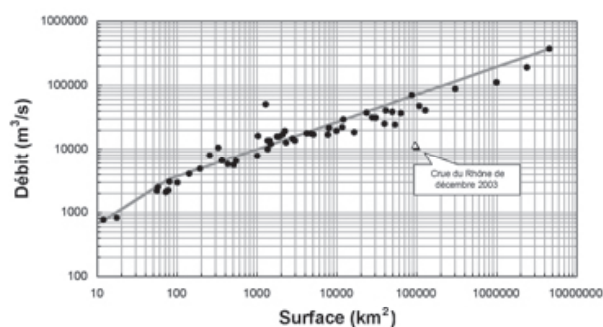


Figure III-1 : Crues remarquables observées dans le monde (données extraites de AISH [2003]).

La figure III-2 correspond aux débits moyens journaliers maxima enregistrés de 163 bassins versants français ayant plus de 40 années d'observations. Les débits de la figure III-2 n'ont pas la même fréquence. Afin de pouvoir comparer sur la même base, nous avons repris les mêmes bassins mais représenté cette fois les débits moyens journaliers décennaux en fonction de la surface drainée (fig. III-3). La configuration des nuages donne l'illusion d'une très bonne relation entre le support de la donnée et le débit, susceptible d'être exploitée pour des sites non jaugés. Il est important de noter que, si ces débits ont, bien évidemment, plutôt tendance à augmenter avec la taille des bassins versants, pour une même gamme de taille, les rapports sont souvent de 1 à 10. Il est donc illusoire de rechercher une valeur maximale universelle en fonction de la surface. La taille du bassin-versant est un facteur explicatif des débits de référence (bien souvent à hauteur de 80 % de la variance dans une régression établie sur les logarithmes) quel que soit le climat, mais n'est pas le seul paramètre à intégrer pour estimer avec précision des quantiles le long du réseau hydrographique.

La figure III-4 nous indique le taux d'augmentation du quantile de débit de crue en fonction de la fréquence puisque, c'est le rapport entre le quantile de crue journalier de période de retour 10 ans et celui de 2 ans. Une diminution en fonction de la surface est perceptible, cependant une assez grande dispersion demeure.

● III.2 Analyses ponctuelles

Il est d'usage d'analyser l'échantillon des maxima annuels des débits moyens journaliers en une station. Les figure III-5, figure III-6 et figure III-7 donnent trois exemples assez

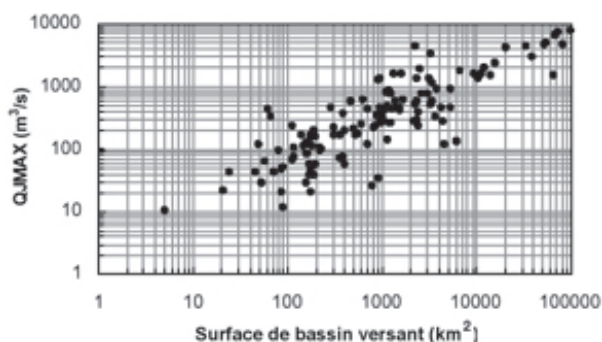


Figure III-2 : Débits journaliers maxima de 163 bassins versants français (données extraites de la banque HYDRO).

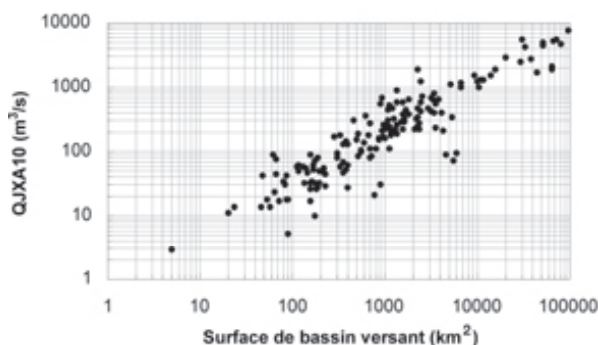


Figure III-3 : Débits journaliers décennaux QJXA10 de 163 bassins-versants français (données extraites de la banque HYDRO).

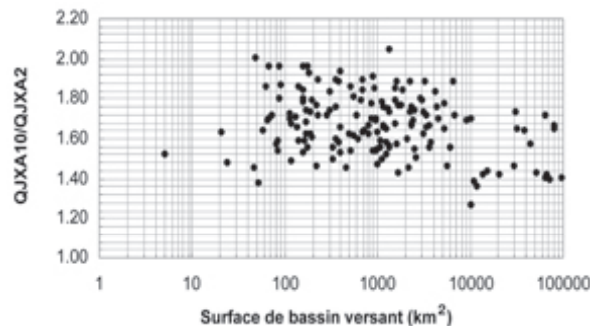


Figure III-4 : Rapport entre le débit moyen journalier de période de retour 2 ans QJXA2 et celui de période de retour 10 ans QJXA10 pour 163 bassins versants français (données extraites de la banque HYDRO).

représentatifs des configurations possibles avec en trait épais l'ajustement à la loi de Gumbel en cadré par des courbes en trait fin définissant l'intervalle de confiance à 90 % autour des valeurs théoriques. Dans la figure III-5, les points semblent suivre une courbe convexe dans le diagramme de Gumbel : les débits croissent plus que ne donnerait la loi de Gumbel ajustée sur l'échantillon. Par contre, la figure III-6 révèle une évolution des débits observés conforme à cette loi, dans la gamme des observations. La figure III-7 montre un comportement bien différent : les points semblent suivre une courbe concave dans le diagramme de Gumbel et les débits croissent peu au-delà d'une certaine fréquence.

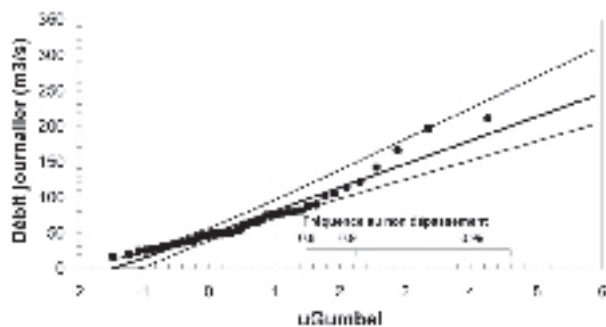


Figure III-5 : La Truyère au Malzieu-Ville).

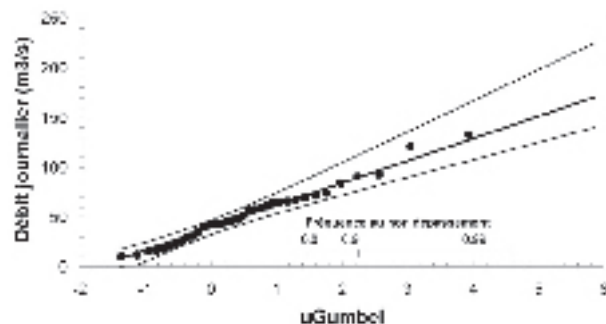


Figure III-6 : La Loire à Usclades-et-Rieutord.

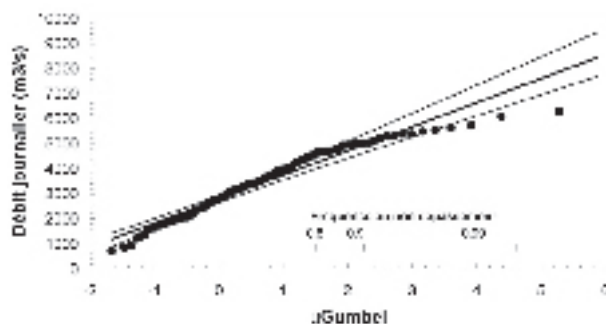


Figure III-7 : La Loire à Montjean-sur-Loire.

La Théorie des Valeurs Extrêmes (EVT) fournit un cadre de référence pour l'analyse statistique des débits extrêmes ; cependant, localement, l'ajustement peut s'écarter significativement du comportement prédit par les lois conseillées. En effet, les crues sont des phénomènes aléatoires, mais une composante déterministe (laminage hydraulique, actions régulatrices de l'homme, par exemple) ou les phénomènes complexes de l'infiltration peuvent contrarier l'application directe de cette théorie aux données. La loi de Gumbel constitue un cas particulier des lois conseillées par l'EVT pour décrire l'échantillon des maxima annuels [Jenkinsons, 1955]. Elle a le bénéfice d'être simple à ajuster sur un jeu de données réduit et a été de fait longtemps privilégiée en France. Elle n'a pas vocation universelle. La présence manifeste d'une courbure (fig. III-5, fig. III-7) devrait soutenir l'usage de la loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV). Il faut malgré tout souligner la difficulté d'estimer de manière robuste le troisième paramètre de la GEV, le paramètre de forme. Au delà de la vérification des courbes de tarage et du caractère stationnaire de la chronique et avant d'exploiter les

quantiles proposés par la banque HYDRO, il convient donc de s'assurer de la légitimité de la loi de Gumbel dont sont issues les valeurs.

IV ■ CONCLUSIONS

Bien que ces phénomènes exceptionnels soient aléatoires et très variables dans l'espace, ils possèdent une certaine structure. Il est donc fondamental pour se protéger des catastrophes naturelles de bien connaître ces structures. C'est pourquoi il faut encourager, notamment en France, des études de synthèse du type atlas des caractéristiques des phénomènes extrêmes et permettre leur diffusion comme cela se fait, par exemple, dans des pays anglo-saxons ou d'autres pays européens.

REMERCIEMENTS

Ce travail fait partie d'une étude financée par le PNRH entre 2000 et 2004 au sein d'une équipe regroupant des chercheurs du Cemagref, Météo France, LTHE Grenoble, Hydro-Sciences Montpellier, EdF DTG, EdF LNHE avec l'appui du MEDD pour l'accès à la banque HYDRO, et avec l'aide des DIREN consultées au sujet de la validité des données en ce qui concerne les débits en France.

BIBLIOGRAPHIE ET REFERENCES

- [1] BOIS P., MAILLOUX H., OBLED C. & DE SAINTIGNON M.F. (1997). — *Atlas expérimental des risques de pluies intenses Cévennes-Vivarais*, Pôle Grenoblois d'études et de recherche pour la prévention des risques naturels, Grenoble, 19 cartes (2^e édition)
- [2] CHAMPION M. (1864). — *Les inondations en France du VI^e siècle à nos jours*. Paris Dunod, 1858-1864. Réédité par le Cemagref. Six volumes et un CD Rom
- [3] FRANCOU J. & RODIER J.A. (1967). — *Essai de classification des crues maximales observées dans le monde*. Cahiers ORSTOM série Hydrologie, 4(3) : 19-46
- [4] IAHS (2003). — *Répertoire mondial des crues maximales observées*. IAHS Publication 284. IAHS Press, Wallington, UK, 285 pages
- [5] JENKINSON A.F. (1955). — *The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological events*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 81 : 158-172
- [6] NEPPEL L., DESBORDES M. & MASSON J.M. (1998). — Caractérisation de l'aléa climatique pluvieux en régions méditerranéenne: analyse statistique des surfaces pluvieuses. Revue des Sciences de l'Eau, 11 (2) : 155-174
- [7] PARDÉ M. (1961). — *Sur la puissance des crues en diverses parties du monde*. Geographica. Edition épuisée. Réédité par le MEDD en 2004, 373 pages
- [8] PEGUY C.P. (1989). — *Jeux et enjeux du climat*. Ed. Masson. 254 pages
- [9] RAMOS M.H., LEBLOIS E. & CREUTIN J-D. (2005a). — From point to areal rainfall: linking the different approaches for the frequency characterization of rainfalls in urban areas. Proc. 10th International Conference on Urban Drainage, CD-ROM, Copenhagen/Denmark, 21-26 août 2005, 8 pages

- [10] RAMOS M.H., CREUTIN J.D. & LEBLOIS E. (2005b). — Visualization of storm severity. *Journal of Hydrology*, 315(1-4) : 295-307
- [11] U.S. WEATHER BUREAU (1970). — Probable maximum precipitation, Mekong river basin., Hydromet. Report N° 46, Silver spring, Md.
- [12] VON MISES R. (1964). — Probability and Statistics, General, American Mathematical Society. 568 pages

SITES WEB :

www.hydrologie.org : site francophone d'hydrologie. Description Fonds Maurice Pardé, documents, photos, thèses en ligne, etc.

www.hydro.rnde.tm.fr : site de la banque HYDRO

www.lthe.hmg.inpg.fr/OHM-CV/index.php : site de l'observatoire Cévennes-Vivarais