

Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations

Michel Lang, Jacques Lavabre,
coordinateurs

Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations

Michel Lang et Jacques Lavabre, coordinateurs
avec les contributions d'Éric Sauquet et Benjamin Renard

Éditions Quæ
c/o Inra, RD 10, 78026 Versailles Cedex

Collection *Update Sciences & Technologies*

Conceptual Approach to the Study of Snow Avalanches.
Maurice Meunier, Christophe Ancey, Didier Richard,
2005, 262 p.

Qualité de l'eau en milieu rural.
Savoirs et pratiques dans les bassins versants,
Philippe Mérot, coordinateur
2006, 352 p.

Biodiversity and Domestication of Yams in West Africa.
Traditional Practices Leading to *Dioscorea rotundata* Poir,
Alexandre Dansi, Roland Dumont, Philippe Vernier, Jeanne Zoundjihèkpon,
2006, 104 p.

Génétiquement indéterminé.
Le vivant auto-organisé
Sylvie Pouteau, coordinatrice,
2007, 172 p.

L'éthique en friche.
Dominique Vermersch,
2007, 116 p.

Agriculture de précision.
Martine Guérif, Dominique King, coordinateurs,
2007, 292 p.

Territoires et enjeux du développement régional.
Amédée Mollard, Emmanuelle Sauboua, Maud Hirczak, coordinateurs,
2007, 240 p.

© Éditions Quæ, 2007

ISBN : 978-2-7592-0364-2

ISSN :1767-7923

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, notamment sa rediffusion sous forme numérique ou imprimée, ou la création de liens hypertextes pointant vers ladite œuvre, faite sans l'autorisation de l'Éditeur ou de l'auteur, est illicite et constitue une contrefaçon, soumettant son auteur et toutes les personnes responsables aux sanctions pénales et civiles prévues par la loi. Seules sont de plein droit autorisées les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées. Tous droits réservés

Sommaire

Préambule	7
Remerciements	9
Chapitre 1. Prédétermination d'événements de référence de crue ..	11
Cadre réglementaire	11
Maximisation de l'aléa	12
Crue historique de référence.....	13
Crue centennale	14
Cadre probabiliste et difficultés d'interprétation	14
Différentes étapes d'une analyse probabiliste.....	16
Plan du guide	20
Chapitre 2. Ajustement d'une loi de probabilité à un échantillon de débits de pointe de crue	23
Le débit : la variable à étudier	23
La métrologie des débits	23
Les bases de données de débit	27
La critique d'une chronique de débits.....	27
Représentation d'un échantillon	30
L'échantillonnage	30
Les horsains ou valeurs singulières.....	32
Construction d'un graphique de fréquence cumulée	33
Exemples d'ajustement sur la distribution du débit de pointe	35
Le Rhône à Perrache : un cas d'école	36
Non-stationnarité ou fluctuations d'échantillonnage : l'Aude à Belviane.....	40
La Berre à Villeneuve-les-Corbières : un événement exceptionnel !	43
Recommandations pratiques pour l'ajustement d'une loi de probabilité.....	45
Chapitre 3. Méthodes probabilistes spécifiques d'estimation des débits de crue de référence sur un site jaugé	51
Établissement de courbes débit-durée-fréquence à partir d'observations hydrométriques	51
Intérêt de l'étude de la durée des crues et des courbes QdF	51
Le modèle QdF convergent.....	54
Méthodes d'extrapolation de la distribution des crues	58

Nécessité d'informations complémentaires pour l'extrapolation des crues...	58
Extrapolation de la distribution des crues par la méthode du Gradex.....	59
Extrapolation de la distribution des crues par le modèle Agregee.....	65
La méthode Speed	66
Extrapolation de la distribution des crues par le modèle Shypre	68
Analyse des crues historiques	72
Construction d'hydrogrammes de référence	76
Formulations analytiques	77
Hydrogramme synthétique monofréquence (HSMF).....	77
Hydrogramme moyen monofréquence.....	78
Hydrogramme d'apport par différence.....	79
Recommandations pratiques pour l'étude des événements extrêmes et la constitution d'hydrogrammes de crue de référence.....	80
Information pluviométrique	80
Information sur les crues historiques	81
Hydrogrammes de crue de référence.....	81
Chapitre 4. Méthodes probabilistes spécifiques d'estimation des débits de crue de référence sur un site non jaugé	83
Régressions multiples	84
La formulation de Bressand-Golossof (1995).....	85
Les courbes-enveloppes de Francou-Rodier (1967).....	85
Synthèse des débits de période de retour 1 000 ans calculés par la méthode du Gradex (Duband <i>et al.</i> , 1988).....	85
Formule Crupedix (Ctgreg <i>et al.</i> , 1980-1982)	86
Formule Socose (Ctgreg <i>et al.</i> , 1980-1982).....	87
Modèles préparamétrés	88
La méthode rationnelle (Stifel W.J. et Mc Pherson M.B., 1964).....	89
La méthode SCS (Soil Conservation Service, 2003)	91
Modèles QdF de référence	92
Estimation de trois paramètres locaux représentatifs du bassin versant	92
Choix d'un modèle de référence QdF adimensionnel	93
Reconstitution du régime des crues par dénormalisation du modèle de référence	94
Modèle QdF régional convergent.....	96
Modèle Shyreg : une méthode régionale pour l'estimation des débits de crue ..	98
Le générateur de hyétogrammes	98
La modélisation de la pluie en débit	101
La régionalisation du modèle pluie-débit.....	101
Agglomération de l'information à l'échelle du bassin versant	101
Contrôle des performances du modèle régional.....	102
Recommandations pratiques pour l'estimation de débits de crue de référence en site non jaugé	104

Chapitre 5. Exemples d'application	105
Construction d'un hydrogramme de projet relatif à la crue centennale.	
Cas du bassin versant de la Moselle à Rupt-sur-Moselle	105
Examen de la dynamique de crue	105
Les volumes générés sur différentes durées.....	106
Courbes QdF dans le domaine des observations.....	109
Extrapolation des courbes QdF aux fréquences rares	112
Hydrogramme de projet centennial (HSMF)	116
Comparaison avec un hydrogramme de projet centennial issu d'une méthode sommaire.....	116
Construction d'un hydrogramme de projet relatif à la crue centennale.	
Cas d'un bassin versant à crues lentes du Nord de la France	118
Distribution des crues fréquentes à moyennes.....	122
Extrapolation de la distribution des crues pour les événements rares	128
Construction d'hydrogrammes de référence.....	135
Conclusion	138
Applications de méthodes de régionalisation en zone méditerranéenne française	138
Présentation des approches testées.....	138
Régressions multiples	141
Modèles préparamétrés	143
Modèle QdF de référence.....	146
Modèle QdF régional convergent	148
Application de la méthode Shyreg à la zone méditerranéenne française.....	149
Comparaison des différents résultats	152

ANNEXES

Annexe 1. Principaux logiciels d'ajustements de lois de probabilité en hydrologie	157
Logiciel Extrêmes.....	157
Logiciel Hydro	158
Logiciel Hydrolab.....	159
Logiciel Hyfran	159
Logiciel PRD' crue.....	160
Logiciel Prethy	161
Logiciel Safarhy	161
Logiciel Winfap-Feh.....	162
Annexe 2. Éléments de probabilités et statistiques appliquées à l'hydrologie	163
Introduction	163
Statistiques descriptives.....	164
Quelques définitions	164
Comment résumer un échantillon ?	165

Étude de deux variables	169
Le modèle probabiliste.....	174
Quelques rappels de théorie des ensembles	174
Premières définitions : probabilité et variables aléatoires.....	174
Loi de probabilité d'une variable aléatoire	176
Statistique inférentielle	185
Retour sur la notion d'échantillon.....	185
L'estimation	190
Les tests statistiques	194
Applications à l'étude des crues	202
Les données.....	202
L'échantillonnage.....	203
Estimation des paramètres des distributions	207
Quantiles, périodes de retour et intervalles de confiance.....	214
Tables usuelles	218
Fonction de répartition de la loi normale réduite	219
Fractiles de la loi normale centrée réduite	220
Fractiles pour la loi du Chi-2 à <i>ndl</i> degrés de liberté	221
Centiles <i>tp</i> pour la distribution <i>t</i> de Student à <i>ndl</i> degrés de liberté.....	222
Distribution <i>F</i> (percentile 95 %)	223
Tables du test de Kolmogorov-Smirnov	224
Annexe 3. Références bibliographiques.....	227
Références citées dans le texte.....	227
Quelques ouvrages francophones de référence en hydrologie et en statistiques.....	232
Sites Web	232

Préambule

Le risque d'inondation touche près de cinq millions de personnes en France. Les événements récents de l'Aude en 1999, du Gard en 2002 et du Rhône en 2003 nous ont rappelé que les enjeux humains et économiques confrontés à ce risque étaient toujours plus importants. Les inondations constituent le premier risque traité par les Plans de prévention des risques (PPR), outil réglementaire de l'État pour la prise en compte des risques naturels dans l'aménagement du territoire : en 2007, 87 % des communes couvertes par un PPR prescrit ou approuvé le sont pour un PPR intégrant le risque inondation, et 67 % de l'ensemble des PPR traitent du seul risque inondation.

Outre l'état des risques, devenu obligatoire avec la mise en place de l'information « acquéreur locataire » au 1^{er} juin 2006¹, et l'action d'information communale au moins une fois tous les deux ans, le PPR impose des servitudes sur l'occupation du sol. Les contraintes qui en résultent rendent d'autant plus indispensable la garantie que tous les citoyens seront traités de façon équitable. Il est donc nécessaire de pouvoir assurer la plus grande rigueur et la plus grande cohérence, aussi bien en ce qui concerne les études d'aléas que l'analyse des enjeux lors de l'élaboration du PPR.

Concernant le risque d'inondation par débordement de cours d'eau, en l'absence de longues séries d'observations, c'est-à-dire dans l'immense majorité des cas, les études hydrologiques laissent une large place à l'expérience et à la subjectivité de l'expert. Il en résulte que l'aléa hydrologique dans le cadre de PPR dépend étroitement de celui qui les détermine et de l'époque de détermination. Ainsi, il n'est pas rare de devoir réévaluer les débits de référence, généralement à la hausse, après quelques années d'observation, et en particulier après un événement conséquent. Ceci n'est pas nécessairement de nature à remettre en cause la qualité des études précédentes, mais illustre bien la complexité de la

1. Loi n° 2003-699 relative à la prévention des risques naturels et technologiques et à la réparation des dommages. Décret n° 2005-134 du 15 février 2005 relatif à l'information des acquéreurs et des locataires de biens immobiliers sur les risques naturels et technologiques majeurs.

réalisation et de la diffusion des études hydrologiques et de la mise en cohérence des pratiques au sein des services instructeurs de PPR.

Ce guide a comme destinataires principaux les services instructeurs de PPR qui sont confrontés aux difficultés liées à la réalisation de ces documents. Il a pour objectif d'aider ces services dans leurs missions, en leur proposant un inventaire le plus exhaustif possible des techniques en hydrologie, ainsi que des recommandations sur leur utilisation.

L'hydrologie n'est pas une science exacte. Un panel très vaste de méthodes existe pour calculer des débits de période de retour donnée, ou inversement pour affecter une période de retour à un débit mesuré. Chaque méthode présente ses spécificités, ses champs de compétences, ses limites et ses résultats. Cet ouvrage n'a pas vocation à privilégier une méthode plutôt qu'une autre, mais à présenter aux lecteurs un état de l'art des méthodes disponibles, ainsi que des recommandations sur leur utilisation, le donneur d'ordre devant être capable de piloter une étude, même s'il n'est pas capable de la réaliser. Ces méthodes sont en constante évolution. Cet ouvrage ne présente qu'une photographie au moment où a été rédigé cet état de l'art. Le lecteur est incité à se renseigner directement auprès des concepteurs des différents outils pour connaître les récentes modifications apportées.

Remerciements

Le guide a été réalisé à l'initiative du ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables (direction de la Prévention des Pollutions et des Risques, bureau des Risques Naturels), avec un suivi de l'avancement du travail par Marie Renne. La rédaction, confiée au Cemagref, a été coordonnée par Michel Lang et Jacques Lavabre, avec les contributions d'Éric Sauquet (modèles QdF et exemples d'application) et de Benjamin Renard (annexes statistiques).

Un second guide, pour le pilotage des études hydrauliques, a été rédigé par le CETMEF sous maîtrise d'ouvrage du ministère de l'Équipement (direction générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction). Ces deux ouvrages ont été validés par un comité, présidé par le conseil général des Ponts et Chaussées, avec l'appui du conseil général de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Espaces ruraux et de l'inspection générale de l'Environnement. Ce comité de validation, placé sous la présidence de Daniel Burette, et composé d'experts en hydraulique ou en hydrologie, ainsi que d'utilisateurs potentiels du guide, a œuvré à une simplification, une amélioration de la compréhension et de la précision de leur contenu, et a permis d'assurer leur cohérence et leur complémentarité.

La composition de ce comité de validation est la suivante :

Daniel Burette	CGPC, président du comité de validation
Yannick Cadet	Diren Franche-Comté
Patrick Chasse	CETMEF
Dominique Chatillon	DDAF du Vaucluse
Philippe Dayet	DDE de la Drôme
Isabelle Descatoires	CETMEF
Michel Lang	Cemagref
Alain Limandat	Ingerop
René Marcaud	Silene
Xavier Martin	IGE
Xavier Pin	CGAAER

Stéphane Piney	LRPC Blois
Michel Ravier	MTETM/DGUHC
Marie Renne	MEDD/DPPR
Patrick Simon	MEDD/DPPR
Hichem Tachrift	LRPC Clermont-Ferrand

Le guide hydrologique a été plus particulièrement analysé, amendé et validé par :

Jacky Astier	BRL Ingénierie Nîmes
Philippe Bois	INPG/LTHE Grenoble
Patrick Fourmigue	CETE Méditerranée Aix-en-Provence
Rémy Garcon	EDF/DTG Grenoble
François Nau	CGPC

Qu'ils en soient tous ici remerciés.

Chapitre 1

Prédétermination d'événements de référence de crue

Cadre réglementaire

Les Plans de prévention des risques naturels (PPRN), institués par la loi n° 95-101 du 2 février 1995, relative au renforcement de la protection de l'environnement, et le décret n° 95-1089 du 5 octobre 1995 remplacent les anciens dispositifs existants, à savoir :

- les Plans de surface submersible (PSS) créés en 1935 (décret d'application du 20 octobre 1937) ;
- les périmètres de risque prévus par l'article R. 111-3 du Code de l'urbanisme (décret n° 77-755 du 7 juillet 1977) ;
- les Plans d'exposition aux risques (PER), introduits par la loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles, et définis par le décret n° 84-328 du 3 mai 1984 relatif à l'élaboration des plans d'exposition aux risques naturels prévisibles.

Le PPR a pour objectif de réglementer les usages du sol dans les zones à risques. Contrairement au Plan local d'urbanisme (PLU) ou au schéma de cohérence territoriale (SCOT), le PPR n'est pas un document d'aménagement du territoire ; il prend en compte l'aléa et les enjeux tels qu'ils sont connus au moment de son élaboration. En revanche, le PPR est une servitude d'utilité publique, et doit être annexé aux PLU des communes sur lesquelles le PPR est approuvé. Le PPR comprend une note de présentation (explication et motivation de la démarche), un zonage réglementaire et un règlement associé à ce zonage. Le zonage réglementaire est élaboré à partir d'une analyse de l'aléa et des enjeux sur le territoire sur lequel le PPR est prescrit. À partir de ce zonage, le règlement prévoit différents types de mesures :

- (i) des règles sur les projets (nouveaux bâtiments ou extensions-modifications d'un bâtiment existant) ;
- (ii) des mesures sur le bâti existant ;
- (iii) des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde.

Dans le cadre des PPR inondations, l'aléa de référence est celui qui correspond à la plus forte crue connue et bien documentée, ou l'aléa centennal si celui-ci correspond à une crue plus forte. Pour le scénario de référence retenu, le niveau d'aléa sur une zone donnée est défini en croisant la hauteur d'eau et la vitesse attendues. Une grille de définition des niveaux d'aléa a été proposée dans le guide méthodologique pour l'élaboration des PPR inondation.

La qualification de l'aléa dans le cadre de l'élaboration d'un PPRI suppose donc que l'on connaisse la période de retour de la plus forte crue historique bien documentée, et si cette période de retour est inférieure à 100 ans d'évaluer la crue centennale. La doctrine pour la qualification de l'aléa disponible dans le guide pour l'élaboration des PPR inondation ne précise pas quel paramètre (hauteur, débit moyen sur n jours ou n heures, débit maximum, volume...) doit être retenu pour la qualification de la crue historique et/ou pour l'élaboration du scénario centennal. Si l'on utilise classiquement hauteur d'eau et débit maximum, l'attention du lecteur doit être attirée sur l'existence d'autres critères qui peuvent être très significatifs pour l'appréciation de l'aléa en fonction du contexte local.

Ce cahier de recommandations ne traitera donc que des études hydrologiques visant à associer une période de retour à une crue donnée, et à construire une crue centennale. Les méthodes présentées peuvent être utilisées dans un autre cadre que celui traité dans ce document. Dans ce cas, les critiques et recommandations formulées dans ce guide ne sauraient être utilisées en l'état.

Maximisation de l'aléa

Une approche intuitive consiste à raisonner sur la dernière grande crue dommageable de la région et à appliquer un coefficient de sécurité sur le débit de référence. Pour réduire l'arbitraire dans le choix de l'événement historique et de la marge de sécurité à retenir, certains auteurs ont reporté sur un graphique les records de crue observés, avec en abscisse la superficie du bassin versant (km^2) et en ordonnée le débit de pointe ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$). Ils tracent ensuite une courbe enveloppe supérieure qui donne un premier ordre de grandeur d'une crue maximale en fonction de la taille du bassin versant.

Ce type d'approche reste très approximatif : le choix d'une large zone géographique — par exemple, la France — permet de disposer d'un échantillon étoffé de valeurs de crues, mais il présente l'inconvénient de mélanger des valeurs issues de régimes climatiques différents ; et le choix d'une zone hydrologiquement homogène, mais plus restreinte, conduit à retenir une courbe enveloppe qui doit être régulièrement revue à la hausse en fonction de nouvelles catastrophes. Le découpage hydrologique en zones homogènes est par ailleurs loin d'être aisé (cf. *figure 1.1*), avec un choix discutable de l'auteur qui dissocie le Languedoc du littoral méditerranéen. Francou et Rodier (1967) ont proposé et formalisé une approche de même type à partir des plus fortes crues observées dans le monde aux XIX^e et XX^e siècles.

L'approche hydrogéomorphologique (Garry *et al.*, 1996) permet, à partir d'une analyse des cartes topographiques au 1/25 000^e, de stéréographies aériennes et de reconnaissances de terrain par un géomorphologue, de distinguer les différentes unités du lit d'écoulement de la rivière : le lit mineur correspond à la section usuelle d'écoulement, le lit moyen assure la transition entre le lit mineur et le lit majeur, et le lit majeur, qui fonctionne pour

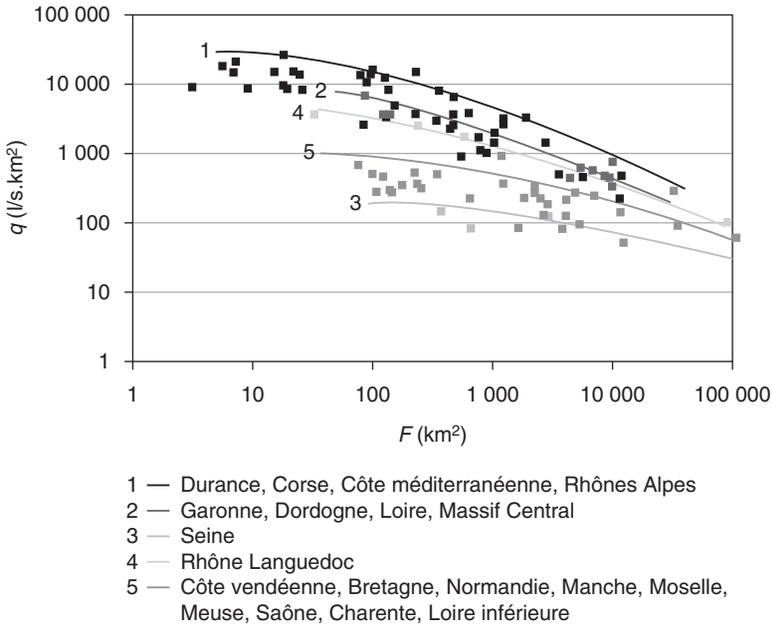


Figure 1.1. Courbes enveloppes de records de crue sur la France (Stanescu, 1997).

les crues importantes, correspond à la plaine alluviale. Les limites de ce dernier lit donnent une idée de l'extension maximale du champ d'inondation. Une approche complémentaire, appelée paléo-hydrologie, permet par ailleurs la reconstitution du niveau atteint par les plus fortes crues depuis plusieurs millénaires, en s'intéressant aux dépôts laissés par les crues, soit directement dans le champ d'inondation, soit dans des grottes surplombant le lit mineur. Des techniques d'analyse stratigraphique et de datation des dépôts (C^{14} , thermoluminescence) sont alors utilisées pour positionner en altitude les plus forts événements, et proposer une chronologie de crues (House *et al.*, 2002 ; Sheffer *et al.*, 2003 ; Benito *et al.*, 2004).

Ces approches naturalistes sont intéressantes dans la mesure où elles permettent d'élargir de façon considérable l'échelle chronologique d'investigation, et de donner des éléments objectifs sur les crues majeures survenues sur le bassin versant. Elles soulèvent toutefois des difficultés d'interprétation pour déterminer si les niveaux de crues atteints dans les conditions climatiques et géomorphologiques du passé restent représentatifs du risque d'inondation futur (*cf.* variations climatiques à l'échelle pluriséculaire, divagation latérale du cours d'eau dans la plaine d'inondation, changement de l'occupation du sol sur le bassin).

Crue historique de référence

Dans le cas d'un grand bassin versant, on dispose généralement d'une information suffisante sur les inondations pour établir un classement des crues ayant occasionné les plus fortes cotes de submersion. Une première difficulté consiste alors à choisir dans cet inven-

taire la crue historique la plus forte connue. Faut-il remonter le plus loin dans le passé, quitte à sélectionner un événement qui ne serait plus représentatif des conditions d'écoulement actuelles ? C'est l'analyse de l'historique des aménagements sur le bassin versant et la rivière qui doit permettre de déterminer le classement des crues en termes de débit, et de retenir la crue la plus pénalisante dans le contexte actuel. Par ailleurs, on observe généralement sur un grand bassin que les contributions de chacun des affluents sont rarement équivalentes, et que le jeu des concomitances peut induire des conséquences très différentes en progressant vers l'aval. Il peut être nécessaire de raisonner sur plusieurs scénarios hydrométéorologiques en fonction de la genèse des crues, comme c'est le cas par exemple sur le Rhône, où l'on distingue les crues de types océanique (secteur amont), cévenol (secteur intermédiaire) et méditerranéen (secteur aval), avec le cas extrême d'une crue généralisée (Safege, 2000).

Dans le cas d'un petit bassin versant, l'information documentaire sur les inondations est en général très limitée, et seules des approches naturalistes (géomorphologie, paléohydrologie) pourront donner des indications sur les crues majeures survenues sur le bassin.

Crue centennale

Cadre probabiliste et difficultés d'interprétation

L'analyse probabiliste repose sur un cadre théorique complet et sur un ensemble d'observations très détaillées. Elle suppose que les phénomènes peuvent être traités comme une variable aléatoire dont les réalisations peuvent revenir indéfiniment, ce qui n'est pas toujours le cas, comme par exemple pour les aléas gravitaires — chutes de bloc, glissements de terrain, laves torrentielles. Dans le cas des inondations, cette hypothèse est acceptable, avec un nombre significatif d'événements, car les rivières sortent plusieurs fois par an de leur lit mineur. Il est donc essentiel de valoriser le patrimoine d'informations sur les inondations pour une meilleure prédétermination de la crue centennale.

Toutefois, la manipulation des concepts probabilistes n'est pas immédiate en l'absence de formation technique appropriée. La période de retour d'un événement souffre de mauvaises interprétations. Elle est souvent considérée à tort comme indicative d'une récurrence régulière du phénomène : « la crue centennale arrive une fois par siècle, je suis tranquille pour quelques années... ». On peut citer le contre-exemple de la Loire-Moyenne, où trois crues supérieures à la centennale ont été observées au XIX^e siècle, en vingt ans (1846, 1856 et 1866), qui n'ont plus jamais été dépassées depuis. Si l'on définit un événement comme le dépassement d'un débit Q_p de référence par le maximum annuel, on peut lui associer deux grandeurs :

- la probabilité annuelle p de non-dépassement du débit Q_p : $p = \text{Prob}[Q < Q_p]$;
- le nombre moyen d'années T séparant deux occurrences d'événement.

La relation entre ces deux variables,

$$p = 1 - \frac{1}{T}, \quad (1.1)$$

montre que le risque d'être confronté à une crue supérieure à l'événement de référence ne dépend ni de la date considérée, ni de la date de la crue précédente. Le *tableau 1.1* montre comment ce risque évolue lorsqu'on augmente la durée de référence :

$$\text{Prob}[Q < Q_p \text{ au moins une fois sur } N \text{ années}] = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^N \quad (1.2)$$

Tableau 1.1. Risque d'observer un événement supérieur à la crue de référence sur une durée donnée.

Quantile Q_p		Probabilité de dépasser au moins une fois le quantile Q_p sur N années				
Probabilité p	Période de retour T (ans)	$N = 1$ an	$N = 10$ ans	$N = 20$ ans	$N = 50$ ans	$N = 100$ ans
0,9	10	10^{-1}	2/3	0,88	0,995	$1 - (3 \times 10^{-5})$
0,99	100	10^{-2}	10^{-1}	0,18	0,40	2/3
0,999	1 000	10^{-3}	10^{-2}	0,02	0,05	10^{-1}

On voit par exemple que la crue centennale, qui revient en moyenne une fois par siècle, a une chance sur cent d'être dépassée chaque année, environ une chance sur cinq en 20 ans (18 %) et un peu moins d'une chance sur deux en 50 ans (39 %), ce qui est loin d'être négligeable à l'échelle de la vie humaine ou de la durée de vie des biens exposés aux inondations. Ce dernier résultat peut paraître surprenant pour un riverain qui pense à tort qu'il a peu de chance de voir une crue centennale en cinquante ans.

Une seconde difficulté réside dans l'échelle géographique de référence sur laquelle on considère les phénomènes. Si un événement centennal défini localement se produit bien en moyenne une fois tous les cent ans au point considéré, il en va autrement à l'échelle du département — ou de la région — auquel il appartient. Si par exemple on s'intéresse au risque annuel d'observer une crue au moins centennale sur une zone constituée de 50 bassins versants dont les crues sont supposées indépendantes, on obtient une probabilité bien supérieure au risque local de 10^{-2} : $1 - 0,99^{50} = 0,40 = 1/2,5$. En moyenne, on devrait observer sur cette zone une crue au moins centennale tous les deux ans et demi. Ainsi, la répétition de crues centennales à une large échelle spatiale n'est ni forcément anormale, ni imputable au changement climatique, à une modification des conditions d'écoulement, ou à une erreur dans l'étude hydrologique. C'est seulement à l'issue d'une analyse détaillée des phénomènes à l'échelle régionale que l'on peut émettre un diagnostic sur le risque d'occurrence sur différentes échelles spatiales.

Une dernière source d'erreur réside dans l'appréciation des probabilités de plusieurs variables. Le débit de crue étant la conjonction d'un état initial de saturation du bassin versant et d'un épisode pluvieux, *il n'y a aucune raison a priori pour que les périodes de retour de la pluie et du débit d'un même événement soient identiques*. On trouve pourtant un certain nombre d'approches de prédétermination basées sur ce principe. Le phénomène de concomitance des crues conduit par ailleurs à des résultats non immédiats. Il s'agit du risque que la pointe de crue d'un affluent soit concomitante avec celle du cours principal ; lorsqu'il y a homogénéité climatique et que les superficies des deux sous-bassins sont voisines, cela se produit assez souvent. En revanche, pour de grands bassins versants, il est peu vraisemblable qu'une crue de même ampleur survienne sur l'ensemble du bassin. À titre d'exemple, l'étude hydrologique des crues du Rhône (Safege, 2000) a montré que

pour obtenir une crue centennale sur le Rhône à Beaucaire (95 600 km²) il suffisait que les crues des principaux affluents soient seulement de fréquence moyenne ($2 < T < 10$ ans).

Différentes étapes d'une analyse probabiliste

À l'issue du travail de recensement des crues anciennes et du choix d'une crue historique de référence, il reste à la comparer à la crue centennale dont le débit a une chance sur cent d'être dépassé chaque année. Le principe de l'analyse probabiliste consiste (cf. *tableau 1.2*) :

- (A) à extraire d'une chronique de valeurs journalières ou instantanées un échantillon de valeurs maximales indépendantes ;
- (B) à valider le choix d'une loi de probabilité adaptée à l'échantillon étudié ;
- (C) à extrapoler la distribution pour des événements rarement ou pas observés.

Chacun de ces points comporte une part d'arbitraire liée à la formulation d'hypothèses dont la validité n'est que partiellement vérifiée, et une part d'incertitudes d'échantillonnage, d'autant plus importante que le niveau d'extrapolation est élevé.

Tableau 1.2. Les points clés d'une analyse locale des probabilités.

Étapes	Points clés
A. Échantillonnage	<ul style="list-style-type: none">• Extraction de valeurs maximales respectant plusieurs hypothèses : caractère aléatoire, valeurs indépendantes, échantillon homogène, processus stationnaire.
B. Validation d'une distribution théorique	<ul style="list-style-type: none">• Choix d'une distribution et d'une méthode d'estimation des paramètres.• Test d'adéquation (statistique, visuel).
C. Extrapolation aux événements non observés	<ul style="list-style-type: none">• Limite de validité à fixer, en fonction de la qualité des données, de la taille de l'échantillon et de la bonne adéquation de la distribution théorique aux observations.

A. Échantillonnage

L'échantillonnage peut être mené par extraction de la valeur maximale annuelle ou de toutes les valeurs supérieures à un seuil. Il est supposé permettre l'obtention d'une collection de valeurs issues d'une variable aléatoire, qui vérifient les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité (toutes les valeurs suivent la même distribution) et de stationnarité (les paramètres de la distribution ne varient pas avec le temps). Ceci conduit à corriger éventuellement les valeurs influencées, à éliminer les valeurs manifestement liées de l'échantillon (même épisode de crue), à tester le caractère saisonnier du régime des crues (si nécessaire, scinder en sous-échantillons de valeurs homogènes), et à vérifier la stationnarité du processus (le cas échéant, scinder en deux périodes). Le cas des valeurs singulières (*outlier* en anglais) est plus délicat ; il nécessite un traitement particulier qui peut être abordé par une analyse historique, régionale ou statistique.

B. Validation d'une distribution théorique

Le choix d'une loi de probabilité est guidé par des considérations théoriques et pratiques. Gumbel (1958) et Pickands (1975), à partir de développements théoriques sur les propriétés asymptotiques des valeurs extrêmes, recommandent respectivement l'usage de la loi des valeurs extrêmes généralisée (GEV en anglais) pour les valeurs maximales annuelles, et de la loi de Pareto généralisée (GP en anglais) pour les valeurs supérieures à un seuil. De nombreuses autres distributions ont par ailleurs été proposées (lois de Gauss, Gamma, Weibull, Halphen...), ainsi que des changements de variables sur les valeurs de l'échantillon (puissance, logarithme...). On retiendra l'existence de trois familles de distributions (*cf.* lois GEV ou Pareto généralisée), suivant la valeur du paramètre de forme ($k > 0$; $k = 0$; $k < 0$), dont le cas des lois de probabilité avec $k = 0$ qui, s'il présente l'avantage de la simplicité et de la robustesse, n'est cependant pas forcément adapté à l'ensemble des phénomènes étudiés.

À titre d'exemple, nous avons reporté le tracé de différentes lois de probabilité (*cf.* figures 1.2 à 1.4) calées sur un même échantillon de la valeur maximale annuelle du débit journalier de la Seine à Bar-sur-Seine (bassin versant de 2 340 km²). La période d'observation s'étend de 1950 à 1979, soit 30 valeurs. La construction de tels graphiques sera détaillée dans le chapitre 2 (§ Construction d'un graphique de fréquence cumulée). Les débits figurent en ordonnée et les périodes de retour en abscisse. L'échelle de l'abscisse est une échelle logarithmique. Les points représentent les observations, et plusieurs lois à deux paramètres ont été reportées : loi normale, loi de Weibull, loi des fuites, loi Gamma incomplète et loi de Gumbel (citées par ordre croissant d'estimation de la crue centennale). Sur la figure 1.2, le débit de la crue décennale (période de retour 10 ans) vaut environ 200 m³/s. Ce débit est celui qui a une chance sur dix d'être dépassé chaque année, et qui est dépassé en moyenne une fois tous les 10 ans. On constate sur la figure 1.2 que l'ensemble

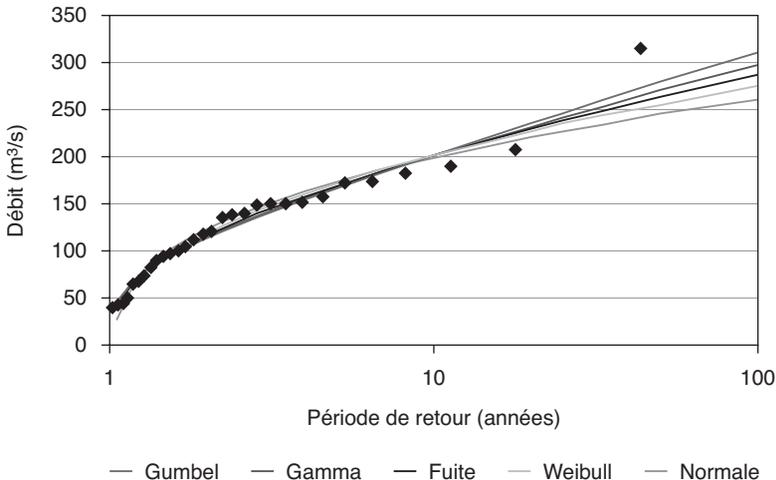


Figure 1.2. La Seine à Bar-sur-Seine. Ajustement de différentes lois de probabilité à l'échantillon des maxima annuels des débits journaliers.

des lois suivent bien la distribution de fréquence empirique des débits, sans accorder trop de poids à la valeur maximale qui s'éloigne quelque peu de l'alignement.

En zoomant sur les périodes de retour élevées (entre 10 et 100 ans) (cf. figure 1.3), on constate toutefois que les différentes lois proposent des extrapolations sensiblement différentes : l'estimation centennale du débit varie entre 260 m³/s selon la loi normale, et 310 m³/s selon la loi de Gumbel, soit un écart relatif de l'ordre de 20 %. À l'expérience, ces différentes estimations de la crue centennale restent comparables compte tenu des erreurs sur la reconstitution des débits (cf. chapitre 2, § Le débit : la variable à étudier) et de l'incertitude d'échantillonnage (cf. annexe 2, § *Quantiles, périodes de retour et intervalles de confiance*).

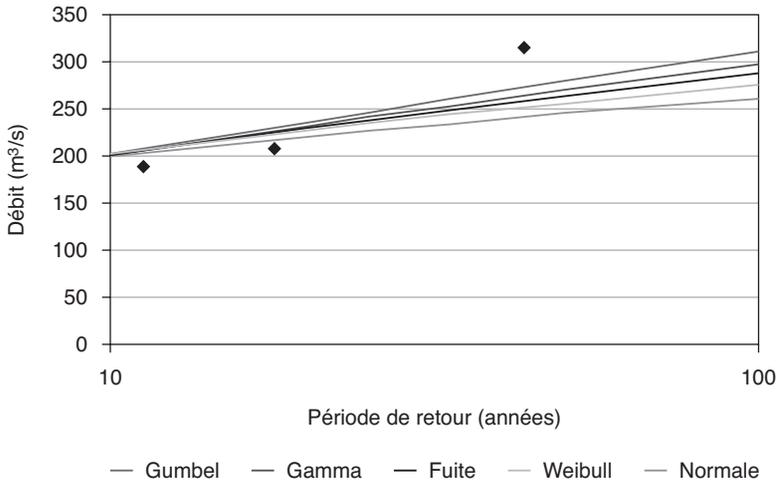


Figure 1.3. Distribution des crues de la Seine à Bar-sur-Seine (zoom sur les périodes de retour élevées).

Afin de coller au mieux à la distribution empirique, les hydrologues effectuent parfois des changements de variables — en général, une transformation logarithmique ou racine carrée des débits. La figure 1.4 présente les courbes de la loi normale et de la loi de Gumbel obtenues après transformation des variables. La loi de Gumbel, avec une transformation racine carrée, et la loi normale, avec une transformation logarithmique (loi de Galton), se rapprochent du plus fort débit. La courbe de la loi normale-racine carrée passe en dessous du point le plus fort, et la loi de Gumbel avec transformation logarithmique (loi de Fréchet) conduit à une extrapolation très supérieure aux autres. L'estimation centennale du débit serait, selon cette loi, de 890 m³/s. On mesure sur cet exemple le poids des hypothèses qui peuvent être faites.

Outre le choix de la distribution, *il existe également plusieurs méthodes d'estimation des paramètres de la distribution*. Les plus connues sont la méthode des moments ou du maximum de vraisemblance (cf. annexe 2, § *L'estimation*), avec également la méthode des moments pondérés (Greenwood *et al.*, 1979), censée être robuste en présence dans l'échantillon de valeurs singulières. On retiendra ici que l'incertitude liée au choix d'une