

# Événements naturels extrêmes : théorie statistique et mitigation du risque

Nicolas Bousquet et Pietro Bernardara

coordonnateurs



**Événements naturels extrêmes :  
théorie statistique  
et mitigation du risque**

## **Dans la collection EDF R&D**

*Électrotechnique des centrales nucléaires*

C. Schroeder, 2018

*Confinement des turbomachines*

L. J. Randrianarivo, 2018

*La maintenance des centrales nucléaires*

J.-P. Hutin, 2016

*Efficacité énergétique – Des principes aux réalités*

P. Baudry, 2016

*Les nanomatériaux et leurs applications pour l'énergie électrique*

D. Noël, 2014

*Guide international du comptage intelligent*

F. Toledo, 2012

*Numériser le travail – Théories, méthodes, expérimentations*

S. Lahlou, V. Nosulenko, E. Samoylenko, 2012

*L'énergie hydraulique, 2<sup>e</sup> édition*

R. Ginocchio, P.-L. Viollet, 2012

*Le système nerveux du réseau français de transport d'électricité (1946-2006) :*

*60 années de contrôle électrique*

J. Lecouturier, 2012

*La physique des réacteurs nucléaires*

S. Marguet, 2011

*Marketing critique : le consommateur collaborateur en question*

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, A. Bonnemaizon, 2010

*Graphes et algorithmes*

M. Gondran, M. Minoux, 2009

*Gestion de la complexité dans les études quantitatives de sûreté de fonctionnement des systèmes*

M. Bouissou, 2008

*Calcul de champ électromagnétique : exemples d'application*

J.-C. Vérité, J.-P. Ducreux, G. Tanneau, P. Baraton, B. Paya, 2007

*Les télécommunications au coeur du système électrique français (1946-2000)*

A. Giandou, C. Leclère, J. Lecouturier, J.-M. Spetebroodt, H. Thibert, A. Vilatte, 2007

*Innové en marketing, 15 tendances en mouvement*

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, 2006

*Éléments finis pour l'ingénieur : grands principes et petites recettes*

P. Thomas, 2006

*Évaluation et maîtrise du vieillissement industriel*

A. Lannoy, H. Procaccia, 2005

# Événements naturels extrêmes : théorie statistique et mitigation du risque

Coordonné par Nicolas BOUSQUET  
et Pietro BERNARDARA

Préface de Emmanuel GARNIER

  
**TEC & DOC**

[editions.lavoisier.fr](http://editions.lavoisier.fr)

*Direction éditoriale* : Jean-Marc BOCABEILLE

*Photo de couverture* :

Eleanor la furieuse. Prise de vue réalisée à la digue nord,  
port du Havre le 3 Janvier 2018. Crédit photo © Jean-Claude Tribout.

## Contributeurs

**Marc Andreewsky** : ingénieur-chercheur EDF R&D, Département LNHE

**Pietro Bernardara** : ingénieur-chercheur expert EDF R&D, directeur du Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique (CEREA), *coordinateur de l'ouvrage*

**Nicolas Bousquet** : ingénieur-chercheur expert EDF R&D, professeur associé à Sorbonne Université, *coordinateur de l'ouvrage*

**Anne Dufloy** : ingénieur-chercheur senior EDF R&D, Département PERICLES

**Thi-Thu-Huong Hoang** : ingénieur-chercheur EDF R&D, Département OSIRIS

**Emmanuel Paquet** : ingénieur hydrologue EDF DIN, Division Technique Générale

**Sylvie Parey** : ingénieur-chercheur senior EDF R&D, Département MFEE

**Nicolas Roche** : ingénieur-chercheur EDF R&D, Département PRISME

**Alain Sibler** : ingénieur-chercheur EDF R&D, Département PERICLES

**Jérôme Weiss** : ingénieur de recherche IFREMER, ancien doctorant EDF R&D

et

**Emmanuel Garnier** : Directeur de Recherche CNRS, Université de Besançon

## REMERCIEMENTS

Cet ouvrage n'aurait pu être écrit sans le concours de nombreux collègues et ex-collègues d'EDF R&D et des unités d'ingénierie d'EDF, de nos collaborateurs académiques, étudiants, doctorants, post-doctorants, d'amis et de proches. Qu'ils soient remerciés pour leurs contributions, conseils et soutiens :

Didier Dacunha-Castelle (Université Paris XI), Ambre Diet (ENSAI), Mathieu Couplet (EDF), Antonin Couturier (ENSAI), Sandrine Dyèvre (EDF), Stéphane Fortier (EDF), Anne-Laure Fougères (Institut Camille Jordan), Jean-Philippe Fontes (EDF), Roberto Frau (EDF), Marie Gallois (EDF), Stéphane Girard (INRIA), François Gourand (Météo-France), Nicole Goutal (EDF), Kaniav Kamary (AgroParisTech), Merlin Keller (EDF), Bertrand Iooss (EDF), Tiphaine Le Morvan (EDF), Cécile Mercadier (Institut Camille Jordan), Vincent Moutoussamy (EDF), Eric Parent (AgroParisTech), Alberto Pasanisi (EDF), Hélène Pesme (EDF), Florent Pezet (ENSAI), Anne-Laure Popelin (EDF), Fabrizio Ruggeri (CMR IMATI Milan). Merci aussi à Amandine Marrel (CEA), dont les conseils post-relecture ont permis d'éclaircir considérablement le propos de ce livre.

Les auteurs tiennent particulièrement à remercier Emmanuel Garnier, Directeur de Recherche CNRS et spécialiste de l'histoire du climat, pour avoir bien voulu préfacier cet ouvrage par une contribution scientifique d'importance, et fait découvrir à ses auteurs la richesse et la variété de ce champ disciplinaire, ainsi qu'Hervé Boll, Directeur délégué aux Programmes d'EDF R&D, et Jean-Paul Chabard, Directeur Scientifique d'EDF R&D, pour leurs encouragements durant la rédaction.



Cet ouvrage a été rédigé avec le meilleur soin possible. Cependant, il est possible que certains oublis ou erreurs s'y soient glissés. D'avance, nous souhaitons remercier les lecteurs qui, les ayant détectées, auraient la gentillesse de nous en faire part.

## CRÉDITS ICONOGRAPHIQUES

Toutes les figures produites par les auteurs ont été obtenues par l'emploi du logiciel R :  
<https://cran.r-project.org/>

Figure 0-1 : image d'origine IGN 2016 sous licence libre, annotée par les auteurs.

Figure 0-2 : image d'origine Wikimedia sous licence CC BY-SA 3.0, annotée par les auteurs.

Figure 2-1 : image Pixabay sous licence CC0, libre de droits commerciaux.

Figure 3-2 : avec l'aimable autorisation du site <http://www.meteociel.fr>

Figure 6-5 : image d'origine Wikimedia sous licence CC BY-SA 3.0.

Figures 8-9, 8-10 et 8-11 : avec l'aimable autorisation de Vincent Moutoussamy (ancien doctorant EDF R&D).

Tableau 8-I et Figure 8-12 : avec l'aimable autorisation de Bertrand Iooss (EDF R&D).





# Table des matières

<b>Notations</b>	<b>23</b>
<b>Extrêmes et Histoire. Pour une meilleure prise en compte des aléas</b>	<b>25</b>
<i>E. Garnier</i>	
Une mine d'or négligée : les archives historiques . . . . .	26
Faire du chiffre avec des mots . . . . .	28
Quelques extrêmes à l'aune de l'histoire . . . . .	31
Les tempêtes continentales . . . . .	32
Les sécheresses . . . . .	33
Les submersions marines . . . . .	36
<b>Événements naturels extrêmes : une introduction</b>	<b>41</b>
<i>N. Bousquet, P. Bernardara</i>	
1 Des enjeux économiques et sociétaux majeurs . . . . .	41
2 Une théorie statistique des extrêmes . . . . .	44
3 Objectifs de l'ouvrage . . . . .	46
3.1 Nécessité d'une approche transverse des extrêmes . . . . .	46
3.2 Une démarche générique pour quels aléas ? . . . . .	47
3.3 Des réponses à de nouvelles appréhensions du risque . . . . .	47
4 Principaux messages . . . . .	48

# **I Quantification des aléas naturels extrêmes** **53**

## **1 Modélisation probabiliste et quantification statistique des aléas naturels** **55**

*P. Bernardara, N. Bousquet*

1.1	Le bien-fondé d'une approche statistique des extrêmes . . . . .	55
1.1.1	Pertinence pratique et champ d'application . . . . .	55
1.1.2	Pertinence phénoménologique . . . . .	58
1.1.3	Comment mener une étude-type ? . . . . .	59
1.2	Approches alternatives . . . . .	62
1.2.1	Adaptation des approches théoriques et autres lois statistiques . . . . .	62
1.2.2	Approches stochastiques par scénarios . . . . .	62

## **2 Concepts fondamentaux de l'aléatoire** **63**

*N. Bousquet*

2.1	Introduction . . . . .	63
2.2	Problèmes unidimensionnels . . . . .	63
2.3	Familles de modèles paramétriques . . . . .	66
2.3.1	Lois . . . . .	67
2.3.2	Tests statistiques . . . . .	69
2.4	Cas multidimensionnels . . . . .	72
2.5	Processus aléatoires et stationnarité . . . . .	73
2.6	Modélisations probabiliste et statistique . . . . .	75
2.7	Contrôle de l'erreur de modélisation . . . . .	76
2.7.1	Convergence des modèles . . . . .	76
2.7.2	Estimation statistique classique . . . . .	79
2.8	Rappels sur la régression . . . . .	85
2.8.1	Approche paramétrique . . . . .	85
2.8.2	Approche non paramétrique . . . . .	86

## **3 Recueil et traitement de données** **89**

*M. Andreewsky, N. Bousquet*

3.1	Introduction . . . . .	89
3.2	Recherche des données disponibles . . . . .	90
3.2.1	La collecte des données . . . . .	90
3.2.2	L'analyse de la quantité de données . . . . .	93
3.3	Vérification de la qualité des données . . . . .	95
3.3.1	Pertinence d'une observation extrême . . . . .	96
3.3.2	Détection de ruptures et valeurs aberrantes . . . . .	99

3.3.3	Traitement des arrondis et bruits de mesure . . . . .	99
3.3.4	Cas de données simulées . . . . .	100
3.4	Caractérisation statistique . . . . .	101
3.4.1	Vérification de l'indépendance des données . . . . .	101
3.4.2	Test d'occurrence des pics (approche POT) . . . . .	104
3.4.3	Vérification de la stationnarité . . . . .	105

**4 Théorie des valeurs extrêmes univariées : pratiques et limitations 113**

A. Dutfoy

4.1	Introduction . . . . .	113
4.1.1	Extrémalité d'un aléa . . . . .	113
4.1.2	Structure du chapitre . . . . .	114
4.2	Résultats fondamentaux . . . . .	115
4.2.1	Quelques définitions . . . . .	115
4.2.2	Théorèmes fondamentaux . . . . .	119
4.2.3	Difficultés d'application . . . . .	123
4.2.4	Pourquoi le choix de lois généralisées ? . . . . .	126
4.3	Caractérisation de l'extrémalité d'un aléa . . . . .	126
4.3.1	Niveau de retour . . . . .	127
4.3.2	Fréquence annuelle . . . . .	130
4.4	Inférence des modèles . . . . .	132
4.4.1	Inférence d'une loi GEV . . . . .	133
4.4.2	Inférence d'une loi GPD . . . . .	137
4.4.3	Précisions sur l'estimateur de Hill de $\xi$ . . . . .	139
4.4.4	Inférence de l'indice extrême $\theta$ . . . . .	140
4.4.5	Validation des modèles . . . . .	141
4.5	Cheminement d'une étude . . . . .	141
4.5.1	Extraction d'un processus stationnaire . . . . .	142
4.5.2	Extraction des <i>maxima</i> annuels et <i>maxima</i> de clusters . . . . .	144
4.6	Application d'un modèle GPD à des données de vent . . . . .	151
4.6.1	Estimation de l'indice extrême $\theta$ . . . . .	151
4.6.2	Validation du modèle inféré . . . . .	152
4.6.3	Estimation des périodes de retour et fréquences annuelles . . . . .	153
4.7	Perspectives . . . . .	154

**5 Analyse des extrêmes par régionalisation 161***J. Weiss, M. Andreewsky*

5.1	Introduction . . . . .	161
5.1.1	Principe général . . . . .	162
5.1.2	Vision historique . . . . .	162
5.1.3	Principe de l'analyse régionale . . . . .	163
5.1.4	Principales étapes d'une analyse régionale . . . . .	166
5.2	Échantillonnage spécifique des extrêmes . . . . .	167
5.2.1	Déclusterisation spatio-temporelle . . . . .	168
5.2.2	Application aux tempêtes marines . . . . .	169
5.3	Formation de régions homogènes . . . . .	174
5.3.1	Identification de l'homogénéité physique . . . . .	174
5.3.2	Vérification de l'homogénéité statistique . . . . .	176
5.3.3	Prise en compte de la dépendance spatiale . . . . .	181
5.3.4	Modèle de dépendance entre les sites d'observation . . . . .	182
5.4	Diagnostics locaux et régionaux . . . . .	183
5.4.1	Construction de l'échantillon régional . . . . .	183
5.4.2	Durée effective régionale . . . . .	184
5.4.3	Période de retour locale et régionale . . . . .	185
5.4.4	Application aux tempêtes marines . . . . .	185
5.5	Performances comparées des méthodes d'analyse . . . . .	187
5.5.1	Traitement des incertitudes sur les niveaux de retour . . . . .	188
5.5.2	Prise en compte des outliers . . . . .	189
5.6	Perspectives . . . . .	191
5.6.1	Formation des régions homogènes . . . . .	191
5.6.2	Hétérogénéité résiduelle . . . . .	192
5.6.3	Analyse régionale historique . . . . .	192
5.6.4	Analyse régionale non-stationnaire . . . . .	193
5.6.5	Analyse régionale multivariée . . . . .	193

**6 Valeurs extrêmes de séries temporelles non stationnaires 195***S. Parey, T.T.H. Hoang*

6.1	Tendances dans les paramètres des lois d'extrême . . . . .	196
6.1.1	Détection et modélisation de tendances . . . . .	197
6.1.2	Estimation et sélection d'un modèle fonctionnel global . . . . .	202
6.1.3	Limitations . . . . .	208
6.2	Approche par évolution moyenne-variance . . . . .	208
6.2.1	Principes méthodologiques de test et de modélisation . . . . .	209
6.3	Redéfinition(s) du niveau de retour et autres critères de risque . . . . .	211

6.3.1	Niveau de retour en contexte non stationnaire . . . . .	211
6.3.2	D'autres critères de risque adaptés à la non-stationnarité . . . . .	214
6.4	Cas d'étude . . . . .	216
6.4.1	Extrêmes de température . . . . .	216
6.4.2	Extrêmes de pluie . . . . .	221

**7 Théorie des valeurs extrêmes multivariées : pratique et limitations 231**

*A. Dutfoy*

7.1	Introduction . . . . .	231
7.1.1	Pourquoi le multivarié ? . . . . .	231
7.1.2	Les difficultés du cadre multivarié . . . . .	232
7.1.3	Plan du chapitre . . . . .	234
7.2	Quelle dépendance ? . . . . .	235
7.2.1	Indépendance asymptotique . . . . .	235
7.2.2	Observation des données . . . . .	237
7.2.3	Mesures et tests de dépendance . . . . .	241
7.3	Résultats fondamentaux . . . . .	249
7.3.1	Ordre partiel et <i>marginal ordering</i> . . . . .	249
7.3.2	Loi limite des maxima multivariés . . . . .	251
7.3.3	Limites du modèle GEV . . . . .	254
7.3.4	Queue de distribution multivariée . . . . .	254
7.4	Cheminement d'une étude . . . . .	258
7.4.1	Démarche générale . . . . .	258
7.4.2	Stratégies d'inférence . . . . .	259
7.4.3	Inférence . . . . .	261
7.4.4	Exploitation des modèles . . . . .	267
7.5	Conclusion et perspectives . . . . .	270

**8 Modèles stochastiques et physiques pour la simulation : une alternative au manque de données 273**

*S. Parey, T.T.H. Hoang, N. Bousquet*

8.1	Introduction . . . . .	273
8.2	Modèles stochastiques issus des statistiques . . . . .	274
8.2.1	Température de l'air . . . . .	274
8.2.2	Précipitations . . . . .	276
8.2.3	Vitesse du vent . . . . .	277
8.2.4	Rayonnement solaire . . . . .	277
8.2.5	Modélisation stochastique par des processus de diffusion bornés . . . . .	279
8.2.6	Cas d'étude 1 : températures extrêmes de l'air . . . . .	286
8.2.7	Cas d'étude 2 : extrêmes d'indices de gel . . . . .	291
8.3	Emploi de modèles numériques dynamiques . . . . .	293

8.3.1	Modèles physiques implémentés . . . . .	293
8.3.2	Exploration et calcul de risque par Monte Carlo . . . . .	295
8.3.3	Robustesse et temps de calcul . . . . .	297
8.3.4	Méthodes de Monte Carlo accélérées . . . . .	300
8.3.5	Mise en œuvre pratique des méthodologies . . . . .	311
8.3.6	Validation dans les situations extrêmes . . . . .	312
<b>9</b>	<b>Traitement bayésien des statistiques extrêmes</b>	<b>319</b>
	<i>N. Bousquet</i>	
9.1	Principes méthodologiques . . . . .	319
9.1.1	La crédibilité plutôt que la confiance . . . . .	319
9.1.2	Traitement de l'incertitude paramétrique . . . . .	321
9.1.3	Sélection de modèle . . . . .	323
9.1.4	Prise de décision pour la mitigation des risques . . . . .	325
9.1.5	Critique pratique du cadre bayésien . . . . .	328
9.2	Modélisation <i>a priori</i> . . . . .	330
9.2.1	Choix d'une mesure de référence . . . . .	330
9.2.2	Choix d'une forme <i>a priori</i> . . . . .	336
9.2.3	Modélisations <i>a priori</i> conjuguées et semi-conjuguées . . . . .	338
9.2.4	Modélisation hiérarchique . . . . .	344
9.3	Calibration . . . . .	349
9.3.1	Calibration fondée sur des données . . . . .	350
9.3.2	Calibration à partir de jugement d'expert . . . . .	357
9.4	Calcul bayésien . . . . .	366
9.4.1	Principe général . . . . .	366
9.4.2	Méthodes MCMC . . . . .	367
9.4.3	Reconstitution de données incomplètes . . . . .	371
9.4.4	Autres approches computationnelles . . . . .	373
9.5	Perspectives . . . . .	374
<b>10</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>377</b>
	<i>M. Andreewsky, P. Bernardara, N. Bousquet, A. Dutfoy, S. Parey</i>	
10.1	Bilan et recommandations . . . . .	377
10.2	Perspectives . . . . .	380
10.2.1	Traitement de grandes bases de données . . . . .	380
10.2.2	Amélioration de la robustesse des lois . . . . .	381
10.2.3	Interactions entre modèles statistiques et numériques . . . . .	383
10.2.4	Pérenniser une vision multidisciplinaire . . . . .	384

**11 Prévision de houle extrême en Vendée**

**389**

*P. Bernardara*

11.1	Contexte de l'étude . . . . .	389
11.1.1	Variable d'étude et niveaux de probabilité . . . . .	389
11.1.2	Collecte des données . . . . .	390
11.2	Échantillonnage des valeurs extrêmes . . . . .	390
11.2.1	Représentation . . . . .	390
11.2.2	Test de stationnarité . . . . .	391
11.2.3	Analyse de l'indépendance des observations . . . . .	392
11.2.4	Analyse de la taille de l'échantillon . . . . .	393
11.3	Estimation statistique . . . . .	393
11.4	Test et vérification graphique . . . . .	394
11.5	Calcul des résultats et analyse critique . . . . .	396

**12 Prévision de surcote extrême à Brest**

**399**

*M. Andreewsky*

12.1	Collecte et pré-traitement des données . . . . .	399
12.1.1	Données originales . . . . .	399
12.1.2	Constitution des échantillons de surcotes . . . . .	399
12.1.3	Prise en compte de l'eustatisme . . . . .	400
12.2	Méthodologie . . . . .	401
12.2.1	Méthodes d'échantillonnage . . . . .	401
12.2.2	Lois utilisées . . . . .	404
12.2.3	Tests statistiques . . . . .	404
12.2.4	Critères pratiques pour l'évaluation des données et des résultats . . . . .	405
12.3	Estimation par <i>maxima</i> annuels . . . . .	406
12.4	Estimation des surcotes extrêmes par la méthode sup-seuil . . . . .	408
12.4.1	Recherche des seuils optimaux . . . . .	408
12.5	Conclusion et discussion . . . . .	414

**13 Prévision de vents extrêmes à Nantes**

**415**

*S. Parey*

13.1	Contexte de l'étude . . . . .	415
13.1.1	Variable d'étude et niveaux de probabilité . . . . .	415
13.1.2	Collecte des données . . . . .	415
13.2	Échantillonnage des valeurs extrêmes . . . . .	416
13.2.1	Analyse par sous-population . . . . .	417



13.2.2	Méthodes d'échantillonnage . . . . .	417
13.2.3	Détection de non-stationnarité . . . . .	418
13.2.4	Analyse de l'indépendance des observations . . . . .	418
13.3	Estimation statistique . . . . .	421
13.3.1	Approche MAXB . . . . .	421
13.4	Tests et vérifications graphiques . . . . .	421
13.4.1	Approche MAXB . . . . .	421
13.4.2	Approche POT . . . . .	422
13.5	Calcul des résultats . . . . .	422
13.5.1	Influence de la jittérisation . . . . .	422
13.5.2	Validation . . . . .	424

**14 Conjonction de pluies sur deux bassins versants voisins 427**

*N. Roche, A. Dutfoy*

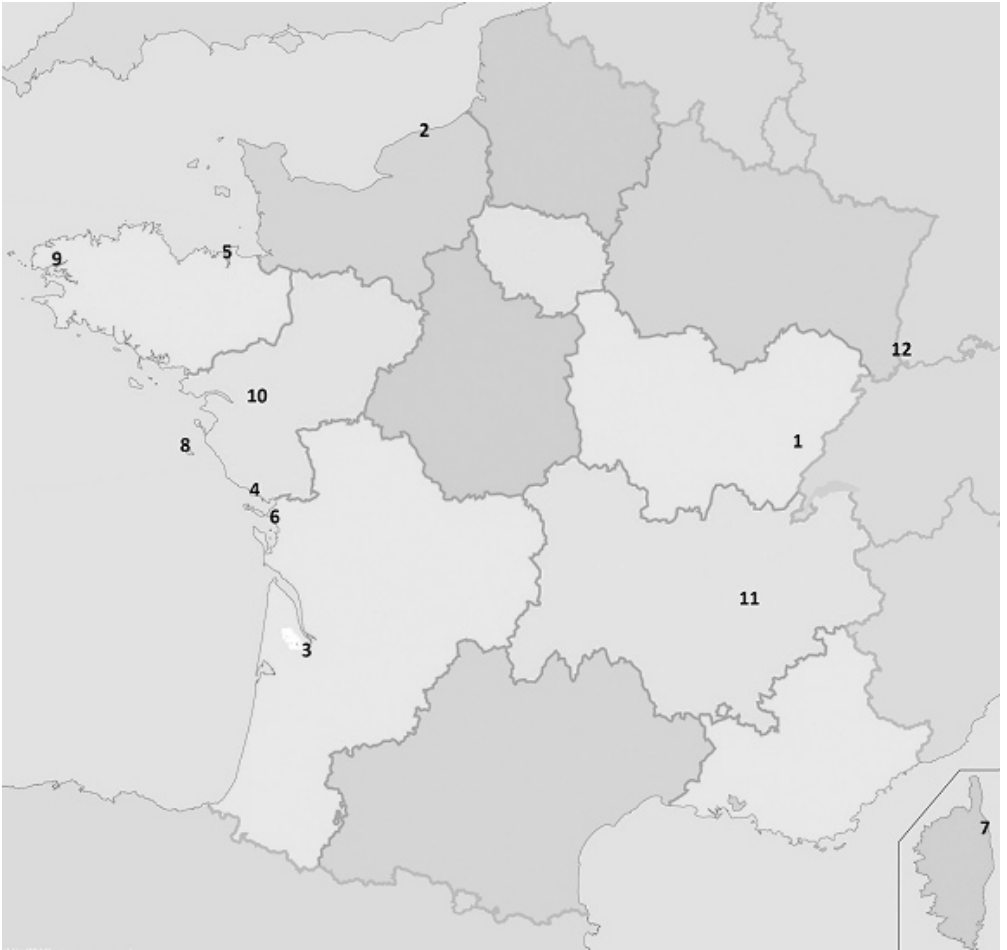
14.1	Introduction . . . . .	427
14.2	Analyse des données . . . . .	427
14.2.1	Le bassin de l'Isère à Grenoble . . . . .	428
14.2.2	Le bassin du Drac à Grenoble . . . . .	428
14.2.3	Les données de pluie de bassin . . . . .	428
14.2.4	Études marginales des données . . . . .	428
14.3	Analyse de la dépendance asymptotique . . . . .	431
14.3.1	Analyse des mesures bivariées dans l'espace des rangs . . . . .	432
14.3.2	Analyse des coordonnées pseudo-polaires . . . . .	433
14.3.3	Test d'indépendance de Falk et Michel . . . . .	435
14.3.4	Conclusion . . . . .	437
14.4	Structure de dépendance . . . . .	437
14.4.1	Fonction de dépendance de Pickands . . . . .	438
14.4.2	Test d'adéquation . . . . .	438
14.4.3	Choix du modèle final . . . . .	439
14.5	Emploi du modèle . . . . .	439
14.5.1	Queue de distribution de la loi jointe . . . . .	439
14.5.2	Loi des pluies conditionnelle à une conjonction d'extrêmes . . . . .	440
14.5.3	Loi marginale d'une pluie conditionnelle à une conjonction d'extrêmes . . . . .	441
14.5.4	Loi conditionnelle des pluies d'un bassin versant . . . . .	441

**15 Conjonction de crue et de tempête 445**

*A. Sibler, A. Dutfoy*

15.2	Introduction . . . . .	445
15.3	Résumé des analyses univariées . . . . .	446
15.3.1	Données disponibles . . . . .	446
15.3.2	Saisonnalité et tendance . . . . .	446

15.3.3	Approche POT et inférence des modèles GPD . . . . .	447
15.4	Analyse bivariée du débit et du vent . . . . .	448
15.4.1	Observations bivariées . . . . .	448
15.4.2	Analyse de la dépendance asymptotique . . . . .	451
15.4.3	Validation physique de la tendance statistique . . . . .	453
15.5	Probabilités et fréquences annuelles . . . . .	455
15.5.1	Probabilités de cumul d'aléas de période de retour . . . . .	455
15.5.2	Fréquences annuelles . . . . .	457
15.6	Perspectives . . . . .	459
<b>16</b>	<b>SCHADEX : une alternative aux extrêmes en hydrologie</b>	<b>461</b>
	<i>E. Paquet</i>	
16.1	Introduction . . . . .	461
16.1.1	Objectifs . . . . .	461
16.1.2	Historique . . . . .	462
16.2	Méthodologie . . . . .	463
16.2.1	Généralités . . . . .	463
16.2.2	Principaux éléments méthodologiques . . . . .	464
16.2.3	Pluie de bassin . . . . .	466
16.2.4	Modèle hydrologique MORDOR . . . . .	468
16.3	Conduite de l'analyse . . . . .	472
16.4	Cas d'étude I : bassin du Tarn à Millau . . . . .	475
16.5	Cas d'étude II : bassin de l'Arve à Arthaz . . . . .	481
<b>17</b>	<b>Outils informatiques</b>	<b>489</b>
17.1	Logiciels utilisés à EDF . . . . .	489
17.2	Packages R . . . . .	490
17.3	Autres outils logiciels . . . . .	490
	<b>Bibliographie</b>	<b>490</b>
	<b>Glossaire</b>	<b>551</b>
	<b>Index</b>	<b>557</b>



**Figure 0-1.** Localisation des principaux sites français étudiés dans cet ouvrage : Besançon (1), Gravelines (2), Bordeaux (3), La Faute-sur-Mer (4), Saint-Servan (5), La Rochelle (6), Penta-di-Casinca (7), Ile d'Yeu (8), Brest (9), Nantes (10), Grenoble (11), Kembs (12).



**Figure 0-2.** Localisation des principaux sites britanniques étudiés dans cet ouvrage : North Norfolk Coast (A), Newlyn (B).

# NOTATIONS

La définition des notations suivantes sera rappelée à leur première occurrence dans le document, et elles seront réutilisées par la suite sans rappel obligatoire. D'une manière générale, les variables aléatoires (v.a.) seront notées en majuscules, les réalisations de ces variables en minuscules. Les vecteurs et matrices sont indiqués en gras, à la différence des scalaires.

## NOTATIONS GÉNÉRALES

---

$\mathbf{X}$	variable aléatoire d'étude, multidimensionnelle en dimension $d$
$X$	variable aléatoire d'étude, unidimensionnelle
$\mathbb{P}(\cdot)$	mesure de probabilité usuelle
$\Omega_{\mathbf{X}}$	notation canonique pour l'espace probabilisé de $\mathbf{X}$
$\mathcal{B}(A)$	tribu ( $\sigma$ -algèbre) des boréliens sur un espace $A$
$P(A)$	ensemble des parties de $A$
$\mathbf{1}_{\{x \in A\}}$	fonction indicatrice
$\emptyset$	ensemble vide
$Z$	variable aléatoire d'intérêt
$\mathbf{x}_i = (x_{1,i}, \dots, x_{d,i})$	réalisation de $\mathbf{X}$
$F_{\mathbf{X}}$	fonction de répartition de $\mathbf{X}$
$f_{\mathbf{X}}$	fonction de densité de probabilité de $\mathbf{X}$
$\theta$	notation générique pour un vecteur de paramètres de la loi de $\mathbf{X}$
$\psi$	espace du vecteur de paramètres $\theta$
$F_{\mathbf{X}}(\cdot \theta)$	fonction de répartition de $\mathbf{X}$ , paramétrée par le vecteur $\theta$
$f_{\mathbf{X}}(\cdot \theta)$	fonction de densité de probabilité de $\mathbf{X}$ , paramétrée par $\theta$
$L(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n \theta)$	vraisemblance statistique des observations $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n$ conditionnelle au vecteur $\theta$
$\pi(\theta)$	densité <i>a priori</i> (bayésienne) sur le vecteur $\theta$
$\pi(\theta \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n)$	densité <i>a posteriori</i> (bayésienne) sur le vecteur $\theta$ sachant un échantillon d'observations $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n$
$\Pi(\theta)$	fonction de répartition <i>a priori</i>
$\Pi(\theta \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n)$	fonction de répartition <i>a posteriori</i>
$\mathbf{a}_n, \mathbf{b}_n$	suites de vecteurs impliquées dans l'énoncé des théorèmes-limites (ex : Fisher-Tippett-Gnedenko)
$N_u$	nombre aléatoire de dépassements d'un seuil $u$
$N_{Cu}$	nombre aléatoire de clusters obtenus pour le seuil $u$
$\chi (\chi^{\text{sup}}, \chi^{\text{inf}})$	coefficient de dépendance de queue (sup / inf)
$\bar{\chi}$	coefficient de dépendance extrême sous indépendance asymptotique
$\mathcal{D}(F)$	domaine d'attraction d'une loi de fonction de répartition $F$
$\ell$	fonction de dépendance de queue stable
$C_{\theta}$ ou $C_F$	copule de paramètre $\theta$ ou associé à une loi multivariée $F$
$\psi$	indice extrême
$\rho$	notation générique pour un coefficient de corrélation
$\boldsymbol{\rho}$	notation générique pour une matrice de corrélation
$\text{sign}(x)$	signe de $x$
$\text{Supp}(f)$	support de la densité $f$
$X^T$	transposée de $X$
$\lfloor x \rfloor$	partie entière de $X$

---

## NOTATIONS GÉNÉRALES (SUITE)

---

$\mathbb{E}_X[.]$	espérance selon la loi de $X$ (le $X$ peut être ôté si pas d'ambiguïté)
$\mathbb{V}_X[.]$	variance selon la loi de $X$
$\mathbb{Cov}_X[.]$	matrice de covariance selon la loi de $\mathbf{X}$
$\mathbb{M}_k[.]$	moment d'ordre $k$
$\mathbb{M}_{k,r,s}[.]$	moment pondéré d'ordres $(k, r, s)$
$\mathbf{I}_m(F)$	espace-image par l'application $F$
$x_p$	niveau de retour associé à une probabilité $p$
$p$	probabilité d'un dépassement (typiquement : annuel) $\mathbb{P}(X > x_p)$
$T$	période de temps utile (typiquement : période de retour $T = 1/p$ )
$\mathbb{R}$	ensemble des réels
$\mathbb{N}$	ensemble des entiers naturels
$z_\alpha$	quantile d'ordre $\alpha$ de la loi normale centrée réduite
$\phi(\cdot)$	densité de probabilité de la loi normale centrée réduite
$L^2$	espace des fonctions de carré intégrable
$\mathcal{C}$	notation générique pour une classe de régularité fonctionnelle
$\langle \dots, \dots \rangle$	produit scalaire canonique
$A^T$	transposée de $A$
$\text{tr}(A)$	trace de $A$
$\text{diag}(A)$	vecteur diagonal de $A$
$ A $	déterminant de $A$
$\nabla X$	gradient de $X$
$\mathbf{0}_d$	vecteur nul de dimension $d$
$X_1 \vee X_2$	vecteur de composantes maximales deux à deux
$\xrightarrow{\mathcal{L}}$	convergence en loi
$\xrightarrow{\mathbb{P}}$	convergence en probabilité
$\xrightarrow{p.s.}$	convergence presque sûre
$\log$	logarithme népérien ( $\ln$ )
$\exp(\cdot)$	exponentielle
$cste$	valeur constante
$resp.$	respectivement

---

Binomiale $\mathcal{B}(N, p)$	$\mathbb{P}(X \leq k) = \sum_{i=0}^k \frac{i!(n-i)!}{n!} p^i (1-p)^{n-i}$
Poisson $\mathcal{P}(\lambda)$	$\mathbb{P}(X \leq k) = \sum_{i=0}^k \frac{\lambda^i}{i!} \exp(-\lambda)$
Normale centrée réduite $\mathcal{N}(0, 1)$	$F_X(x) = \Phi(x)$
Gaussienne $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$	$F_X(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$
Exponentielle $\mathcal{E}(\lambda)$	$F_X(x) = 1 - \exp(-\lambda x)$
Gamma $\mathcal{G}(a, b)$	$F_X(x) = \frac{\gamma(a, bx)}{\Gamma(a)} \quad \text{avec } \gamma(a, x) = \int_0^x t^{a-1} \exp(-t) dt$
Inverse gamma $\mathcal{IG}(a, b)$	$F_X(x) = \frac{\Gamma(a, b/x)}{\Gamma(a)} \quad \text{avec } \Gamma(a, x) = \int_x^\infty t^{a-1} \exp(-t) dt$
$\chi_k^2$ (Chi-2)	$F_X(x) = \frac{\gamma(k/2, x/2)}{\Gamma(k/2)}$
Student $\mathcal{S}_t(k)$	$F_X(x) = \frac{1}{\sqrt{k\pi}} \frac{\Gamma(\frac{k+1}{2})}{\frac{k}{2}} \int_{-\infty}^x \left(1 + \frac{t^2}{k}\right)^{-\frac{k+1}{2}} dt$
Extrêmes généralisée $\mathcal{GEV}(\mu, \sigma, \xi)$	$F_X(x) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]_+^{-1/\xi}\right\}$ avec $[x]_+ = \max(x, 0)$
Pareto généralisée $\mathcal{GPD}(u, \sigma, \xi)$	$F_X(x) = 1 - \left\{1 + \xi\left(\frac{x-u}{\sigma}\right)\right\}^{-1/\xi}$

---

ESTIMATEURS STATISTIQUES

---

Si  $\theta$  est un vecteur de paramètres à estimer, on utilisera les notations  $\hat{\theta}$  ou  $\hat{\theta}_n$  pour désigner un estimateur statistique de  $\psi$  fonction d'un échantillon de tirages de taille  $n$

---

ABRÉVIATIONS (SANS POINTS SÉPARATEURS)

---

<i>iid</i>	indépendant et identiquement distribués
<i>va</i>	variable aléatoire
EMV	estimateur du maximum de vraisemblance
EMC	estimateur des moindres carrés

---



# Extrêmes et Histoire

## Pour une meilleure prise en compte des aléas

*Emmanuel Garnier*

Il peut paraître étonnant, sinon discutable, de faire appel à un historien pour préfacier un ouvrage intitulé *Événements naturels extrêmes. Théorie statistique et mitigation du risque* dont les différentes contributions sont l'œuvre d'ingénieurs experts et chevronnés. Pour autant, ses coordinateurs et ses co-auteurs ont jugé bon de me faire l'honneur de me solliciter pour introduire ce magnifique travail collectif dont la vocation pédagogique est clairement affichée.

*De facto*, ce livre procède de deux constats majeurs : le premier prend acte de la rareté des manuels traitant de la théorie statistique des extrêmes et, partant, des difficultés rencontrées par les étudiants et les ingénieurs pour renforcer leur expertise dans ce domaine stratégique. Le second constat – *deo gratias!* – légitime d'une certaine manière l'intervention d'un historien puisqu'il prend acte de la relativité des méthodes statistiques quand elles se heurtent à une autre réalité, celle des événements dits « imprévisibles » comme, par exemple, un barrage de castors qui provoque une inondation désastreuse au Québec, rendant caducs les modèles hydrologiques patiemment élaborés par le gestionnaire ....

Or, en allant puiser au plus profond des veines archivistiques des sociétés anciennes, l'historien injecte justement pléthore « d'événements imprévisibles » qui peuvent éventuellement perturber les modèles, réalité qui explique l'intérêt soutenu du monde de la réassurance pour ce type d'informations [318].

En faut-il une preuve ? En 2008, alors que je conduisais des recherches au sein d'un laboratoire français de climatologie très prestigieux, j'avais fait part à mes collègues et à d'autres spécialistes de la gestion des catastrophes, du risque historique de voir une éruption volcanique affecter le continent européen. Profondément déconcertés, mes interlocuteurs m'avaient alors fait comprendre poliment que cette éventualité était totalement improbable et qu'une telle idée procédait

probablement d'une surinterprétation des sources historiques, « par définition peu fiables ... ». J'eu beau évoquer le terrible précédent du volcan islandais Laki au cours de l'été 1783, qui tua des dizaines de milliers d'individus, rien n'y fit. Deux ans plus tard pourtant, le volcan Eyjafjöll entra en éruption avec les conséquences économiques et sociales que l'on connaît [305, 307, 311] ...

## Une mine d'or négligée : les archives historiques

Pour étudier les extrêmes du passé, l'historien recourt concurremment aux données directes et indirectes. Les premières désignent les informations issues des archives qui décrivent, si l'on s'intéresse au climat, le temps qu'il fait à une date donnée. Si leur teneur est surtout instrumentale, comme les relevés météorologiques effectués par les auteurs de journaux privés ou les scientifiques, on y trouve également des descriptions précises d'événements climatiques extrêmes. *A contrario*, les secondes traduisent plutôt l'influence de la météorologie et de la géologie sur les composantes naturelles que sont la biosphère et l'hydrosphère. Plus concrètement, elles renseignent de manière indirecte sur les inondations, les sécheresses, les tempêtes, les volcans, les séismes, les embâcles ou encore les stades végétatifs.

Pléthoriques et variées, les sources phénologiques permettent l'étude des variations que font subir les climats aux phénomènes annuels et périodiques de la végétation (germination, floraison, dates de maturation des fruits) et du règne animal (chant des oiseaux, migrations, nidification, etc.) dès le XIII<sup>e</sup> siècle dans le cas français. On y trouve pêle-mêle les bans de vendanges, les dates de moissons ou de récoltes des fruits (olives, pommes, etc.). Si elles bénéficient d'une reconnaissance certaine de la part des paléoclimatologues, elles n'en demeurent pas moins sujettes à discussion. On reproche à leurs utilisateurs de ne pas tenir compte d'un certain nombre de paramètres anthropiques fondamentaux comme les changements culturels et les contextes géopolitique et épidémiologique. C'est à ce niveau d'incertitude qu'il revient à l'historien, spécialiste des archives, d'intervenir afin de « dépolluer » les séries de leur empreinte sociale. Ainsi, la contextualisation des bans de vendanges de la ville de Besançon (cf. Figure 0-1) entre 1525 et 1850 a prouvé que les événements militaires et les épidémies de peste jouèrent un rôle décisif lors de la fixation des dates de récoltes, à hauteur de 25% [317]. Enfin, il convient de rappeler que l'emploi de la phénologie pour reconstruire les climats du passé comporte une limite de taille : sa saisonnalité, qui accorde le primat à la belle saison au cours de laquelle croît la plante.

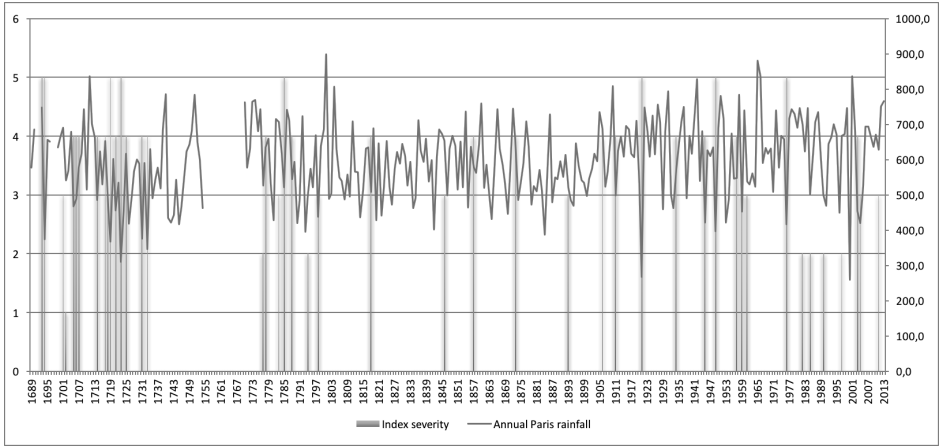
Filon inépuisable du disciple de Clio, les archives administratives offrent concurremment deux atouts de taille : la continuité chronologique (généralement depuis le XV<sup>e</sup> siècle) et l'homogénéité de l'information. Les fonds urbains contiennent des sources de première main que sont les délibérations municipales et les comptes

des villes au sein desquelles le volet catastrophique est omniprésent. Tout événement extrême avait un impact sur les infrastructures (ponts, moulins, canaux) et le fragile équilibre socio-économique de la cité. Il suscitait donc un débat, ainsi qu'une prise de décision de la part des élus. Plus encore, les sources urbaines résolvent le problème de la représentativité saisonnière. En effet, à la différence des campagnes, la morte-saison n'existe pas en ville et les élus expriment la même sensibilité à une sécheresse estivale qu'à un embâcle hivernal.

Engagés dans une phase de centralisation, les États princiers se dotent dès le XVII<sup>e</sup> siècle de nouveaux outils bureaucratiques. Le processus est particulièrement évident en France où la monarchie crée des administrations spécialisées, productrices d'archives. Aux registres de chablis (arbres déracinés par les vents) tenus depuis les années 1560 par l'administration forestière répondent les rapports de mer des Amirautés de la *Royal Navy* implantées sur les littoraux et qui relatent les événements maritimes extrêmes (tempêtes, submersions, tsunamis, etc.). C'est également à partir de cette époque que nous disposons des premières observations météorologiques modernes avec la fondation de l'Observatoire de Paris (1669) et son corollaire, l'Académie royale des sciences puis, un siècle plus tard, la Société royale de médecine en France (1778), la *Royal Society* de Londres ou encore la *Societas Meteorologica Palatina* à Mannheim [306].

Sources complémentaires, les écrits du for privé comportent les journaux et les livres de raison rédigés par des particuliers. Eux aussi font la part belle au fait catastrophique. Plus surprenant, les archives produites par les Églises catholique et protestante, de par le monde, offrent un très large panel de documents exceptionnels. Parmi eux figurent notamment les processions « pour la pluie » ou « pour la sérénité du temps », selon le contexte climatique du moment, et qui renseignent sur des extrêmes comme les sécheresses, les inondations ou les grands froids. Autre piste très féconde également, les registres paroissiaux, dans lesquels le prêtre ou le pasteur enregistrait les décès. Ils permettent ainsi d'appréhender le tribut démographique induit par une crise ou bien l'impact d'une tempête sur un clocher d'église. Purement catholique, l'*ex-voto* traduit, sous une forme picturale, la survenue de catastrophes du passé et exprime sa perception sociale. Plus qu'un simple tableau commémoratif, il avait pour fonction, à une époque de forte pratique religieuse, de rappeler la persistance d'un risque (maritime, volcanique, climatique) pour la communauté [611]. Ces sources ecclésiastiques peuvent renseigner le chercheur *ès* aléas pour des parties du monde parfois inattendues. Peut-on imaginer, par exemple, qu'il est désormais tout à fait envisageable (si les moyens financiers sont au rendez-vous ...) de reconstituer une histoire des extrêmes de la Chine à partir des archives de missionnaires français ? Très bureaucratique, l'institution catholique a généré des milliers de rapports entre les années 1600 et le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Versés dans les sciences, les prêtres effectuaient des relevés météorologiques systématiques et consignaient toutes les catastrophes (tsunamis,

submersions, tremblements de terre, etc.) dont ils avaient été les témoins<sup>1</sup>.



**Figure 0-3.** Comparaison des sécheresses en France (ordonnée de droite : quantifiée selon la *Historical Severity Drought Scale* (HSDS)) avec le cumul annuel de pluie (ordonnée de gauche : en mm) à Paris entre 1689 et 2013. Source : E. Garnier (2017).

## Faire du chiffre avec des mots

De manière très schématique, la démarche consiste à traquer dans les archives, comme le ferait n'importe quel historien, l'information non instrumentale apparaissant sous la forme de données directes ou indirectes puis, à la « convertir » en indicateur des variations climatiques (températures, précipitations, pression barométrique) au cours de la période retenue. C'est bien là que réside le défi scientifique et disciplinaire le plus audacieux dans la mesure où il s'agit désormais de traduire ces milliers de données majoritairement écrites en séries temporelles. Ce processus ne peut se concevoir sans la réalisation d'une base de données (BDD) dans laquelle toutes les informations recueillies sont classées afin de pouvoir offrir une vision synthétique et chronologique des résultats mais encore plus, d'en faciliter un traitement statistique. Néanmoins, il importe de préciser que pour être utiles, ces données doivent absolument être collectées à des échelles pertinentes, entendons régionale ou départementale. Dans le cas contraire, les biais liés aux variabilités climatique et topographique risquent fort de générer des séries aberrantes. À ce jour, les informations climatiques textuelles et instrumentales collectées s'élèvent à près de 100 000 données. Loin d'être définitives, elles ont vocation à s'enrichir grâce aux projets en cours et à venir.

Une donnée désigne ici une information « aléa » et non une mention car un

<sup>1</sup>Voir <https://gdri-ehede.univ-fcomte.fr/spip.php?article58&lang=en>.

même extrait peut parfaitement évoquer deux phénomènes. Ainsi une tempête pourra être accompagnée de fortes précipitations. De gauche à droite sur la figure 0-4 apparaissent successivement l'événement, la source précise, l'estimation de la fiabilité de la source, le lieu, l'année et la date exacte quand elle est indiquée puis le texte livré *in extenso* afin de permettre ultérieurement à n'importe quel chercheur de retourner à la transcription brute s'il souhaite retrouver une information précise ou éventuellement réinterpréter le contenu de la source.

Cette étape préalable effectuée, reste à produire des valeurs tirées de ces archives en transformant ces données basiques en indices météorologiques (températures et précipitations), de sévérité ou encore sismiques (échelle EMS<sup>2</sup>) qui permettent de faire la jonction entre les séries textuelles (les plus anciennes) et les séries instrumentales [313]. Pour ce faire, le contenu descriptif des archives écrites offre la possibilité d'établir une échelle d'intensité des extrêmes historiques, à condition qu'elle soit conçue en symbiose entre l'historien, l'ingénieur, le modélisateur et/ou l'assureur. Si l'on prend l'exemple des submersions marines, il est aisé de comparer un événement du passé avec son homologue contemporain en prenant en compte les dommages causés aux infrastructures et aux sociétés comme la destruction des dunes, des digues, les surfaces inondées ou encore les pertes humaines [316] (Tableau 0-I). De la sorte, le système d'indexation des intensités débouche sur la réalisation de courbes continues sur des périodes de temps extrêmement longues dont les comparaisons sont désormais pertinentes statistiquement.

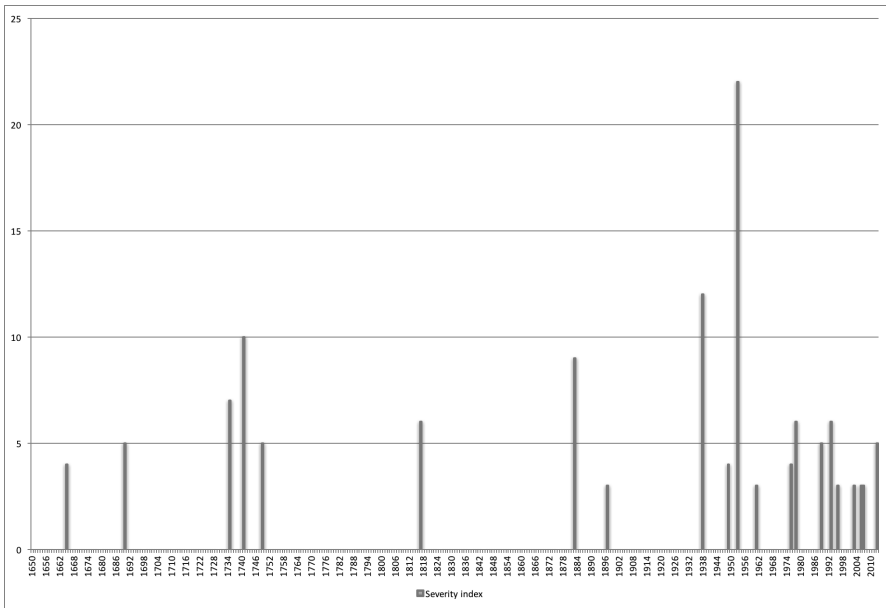
**Tableau 0-I.** Règle de catégorisation de la sévérité des crues historiques avant l'arrivée de l'instrumentation.

Catégorie	Nature des dommages selon les archives historiques
5	Événement exceptionnel à cause de son ampleur géographique (locale, régionale et nationale), son coût financier et social (pénuries, émeutes, forte mortalité)
4	Dommages très importants à l'échelle régionale : infrastructures hydrauliques, ponts, fermes, bétail, récoltes, lignes de communication
3	Dommages importants mais limités à quelques localités ou une cité : coût, pénuries, bétail noyé, mortalité humaine
2	Dommages peu importants et très localisés : quelques villages, terres agricoles, zones humides, voisinages de cours d'eau
1	Événement simplement mentionné dans les sources, faibles dommages, très localisé
-1	Pas d'information autre qu'une mention dans des sources historiques

<sup>2</sup>Échelle macrosismique européenne, qui mesure l'intensité et la gravité d'un tremblement de terre.

1	Hazard type	Source name	Quality index of the source	Exact location	County	Province	Year/Date	Description
	Sea surge	Arch. Mun. de Saint-Omer, BB 34	4	Saint-Omer	Pas-de-Calais	Nord-Pas-de-Calais	12/01/1613	"Le 12 de janvier, les vents et pluies continuelles augmentant de plus en plus les inondations causent partout des pertes et des dommages considérables et principalement dans la plus part de tous nos biens de Gravelines, Bourbourg, pays de Langles, & dont toutes les terres n'étoient qu'une mer. Depuis 1606(pluât 1609) on ne vit point ni pareilles tempêtes ni de telles inondations. Mgr l'évêque de St Omer ordonna des prières publiques avec litanies pour implorer la divine miséricorde."
2	Flood	Arch. Mun. de Saint-Omer, BB 34	4	Saint-Omer	Pas-de-Calais	Nord-Pas-de-Calais	08/03/1610	"Les eaux du ciel se sont tellement repandues dans le pais quelles l'ont tout a fait inondées et empeché la navigation et la chatoine de bourbourg a fait fermer des esclues le vingt neuf decembre, ainsy point encore de navigation a esperer pour le supliant"
3	Frozen sea	Archives municipales de Dunkerque, AncDK3, folio 67	4	Dunkerque	Nord	Nord-Pas-de-Calais	14/01/1697	"Bourgm(est)re et eschevins de la ville et territoire de Dunkerke ordonnent aux gens de loy de Zudeoot (Zuydcoote), Leffrenouck (Leffrinckoucke), branche de Coudekerke (Coudekerque), Teteghem, Uxem et Ghivelle (Ghyvelde) de continuer a faire rompre pressamment la glace dans le canal de Furnes avec la mesme quantite d'hommes qu'ils ont fait pendant la dernière gelée"
4	Earthquake	Archives municipales de Dunkerque, AncDK87	4	Dunkerque	Nord	Nord-Pas-de-Calais	18/05/1773	Le trois decembre dernier un petit mouvement qui toucha le petit port de Coppenhaguefort a fraccassé et emporté sept fenêtres a un de mes carresses qui lay a coûté considérablement sans y comprendre l'intérêt ...

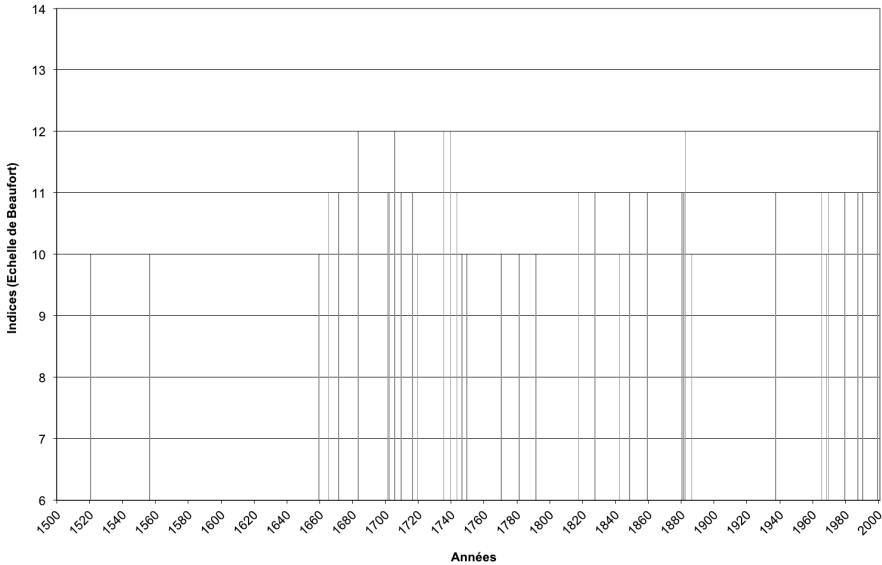
Figure 0-4. Extrait d'une base de données historiques (région de Gravelines, Mer du Nord, cf. Figure 0-1). Source : E. Garnier (2017).



**Figure 0-5.** Historique du score d'impact des ondes de tempête sur la côte du North Norfolk (Royaume-Uni, cf. Figure 0-2). Ce score est établi à partir de la caractérisation de nombreux type de dommages, comme les inondations de bâtiments, les pertes en vies humaines, de récoltes, de bétail, les surfaces noyées, les dommages aux infrastructures et le coût financier engendré par l'événement.  
Source : [316]

## Quelques extrêmes à l'aune de l'histoire

En pratique, la documentation historique est truffée de « monstruosités » et de « dérangements », expressions en usage jadis pour désigner ce que nous appelons de nos jours les extrêmes. Et pour cause, ces extrêmes, hier comme aujourd'hui, impliquent un impact social, mieux connu sous le nom de catastrophe. Sur le plan climatique, nos décideurs, nos médias et même une partie de la communauté scientifique n'ont de cesse d'affirmer qu'ils connaîtront une recrudescence et une aggravation de leur intensité. Parmi toutes les incertitudes et les interrogations soulevées par ce débat, une question majeure émerge : les récents événements extrêmes peuvent-ils être étudiés dans la perspective d'une comparaison avec des événements historiques afin d'évaluer de manière plus précise les conséquences sociales, économiques, politiques et culturelles pouvant en découler ? Comble de bonheur pour l'historien, ces événements, en raison même de leur caractère extrême, ont semé quantité de petits cailloux blancs très repérables dans les sources anciennes et il suffit d'y puiser sans modération pour reconstruire une histoire très



**Figure 0-6.** Tempêtes (force  $\geq 10$ ) en Europe entre 1500 et 2000. Source : E. Garnier (2017).

robuste des pires aléas au cours des cinq derniers siècles.

### *Les tempêtes continentales*

Fondé sur le dépouillement des archives, le verdict de l'histoire dément les propos de ceux qui, au lendemain de la catastrophe de décembre 1999, insistaient sur le caractère exceptionnel et nouveau des aléas venteux. Sous l'Ancien Régime par exemple, il serait plus à propos de parler de « tempêtes du siècle » tant les éléments se déchaînent avec régularité en fonction des conjonctures climatiques du moment. Les cinq cents ans étudiés (1500-2000) sur la Figure 0-6 révèlent ainsi une chronologie faite de mouvements contradictoires marqués successivement par des offensives et des rémissions. Sur l'ensemble de la période, 22 événements compris entre la tempête (force 10) et l'ouragan (force 12) ont concerné le Nord de l'Europe avec un rythme de retour de l'ordre d'une quinzaine d'années, 80% d'entre eux éclatant au cours des mois de janvier, février et mars. Gardons-nous cependant d'en tirer des généralités car il s'agit de récurrences hasardeuses qui ne tiennent pas compte des inégalités locales et chronologiques.

Néanmoins, certaines périodes apparaissent plus critiques que d'autres et les archives de l'administration forestière signalent ainsi des années à « chablis »



(arbres abattus par le vent) en 1580-1640, 1710-1770 et 1870-1920. Si l'on ne retient que les phénomènes majeurs, quinze événements compris entre force 10 et 12 touchent la France. Pour les Temps modernes, les XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles font figure de parents pauvres – mais les lacunes documentaires y sont probablement pour beaucoup – en comparaison du dernier siècle de l'Ancien Régime (avant 1789) qui enregistre huit catastrophes dont cinq inscrites dans le seul créneau 1720-1760. Cette accélération éolienne ne relève pas du hasard et il suffit de la recouper avec le contexte climatique global pour constater qu'elle se développe lors d'un relatif réchauffement accompagné par une forte activité dépressionnaire.

Ultérieurement, l'amélioration météorologique se poursuit en dépit de quelques retours du froid engendrés par les ultimes contre-offensives du petit âge glaciaire au cours des années 1780. Pour autant, la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle n'est pas exempt de tempêtes comme en témoigne la tempête du 17 janvier 1784 qui dévasta le littoral atlantique. Son retentissement national fut tel que la prestigieuse Société Royale de Médecine diligenta une enquête dans les jours qui suivirent l'événement. Elle déboucha sur la rédaction d'un mémoire exhaustif relatant les conditions météorologiques et les dégâts. Il faut dire qu'Éole eut, ce jour-là, la main particulièrement lourde en provoquant le naufrage d'une trentaine de navires et la mort d'une cinquantaine de personnes [308].

Engagé dans une révolution industrielle à l'échelle de l'Europe, le siècle suivant révèle une série impressionnante de violentes tempêtes et d'ouragans qui ravagent aussi bien le Nord que la partie méridionale du pays au cours des années 1842, 1869, 1872, 1876 et 1894. Observation de taille à souligner néanmoins, les aléas majeurs sont plus nombreux au XVIII<sup>e</sup> siècle (9 événements) qu'au XX<sup>e</sup> siècle (7 événements), même en y comprenant la tempête Lothar-Martin de 1999.

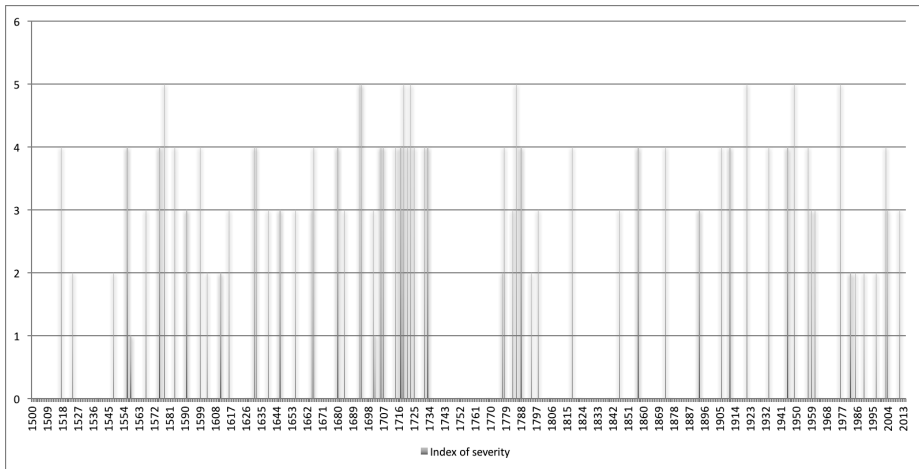
### *Les sécheresses*

Les sécheresses marquèrent de tout temps les sociétés rurales et urbaines au point de figurer très régulièrement dans les sources de l'époque. Pour mémoire, il convient de rappeler que le terme général de « sécheresse » recouvre des notions différentes. En premier lieu, dans son acception la plus fréquente, elle est bien sûr toujours liée à un déficit pluviométrique.

Dans cette perspective, et faute de pouvoir prendre en compte le critère de sa déviation par rapport aux valeurs moyennes ou normales de la pluviométrie, inexistantes avant le milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, la démarche consiste à s'appuyer sur des éléments quantitatifs présents dans les sources comme la durée, la période d'occurrence et l'extension géographique des événements secs. Ce parti est acceptable quand on sait qu'aujourd'hui, aussi bien au niveau de l'Organisation Météorologique Mondiale que pour Météo-France, la caractérisation de la sécheresse en tant qu'événement extrême est établie en fonction du nombre de jours

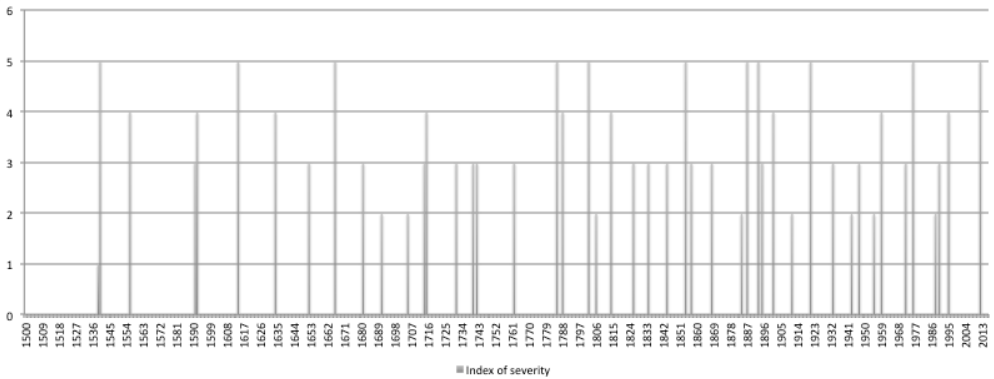
sans pluie. Or, les archives ont l'immense avantage, une fois n'est pas coutume, de ne pas cultiver l'ambiguïté quand elles précisent à la fois les dates (religieuses le plus souvent) de début et de fin des épisodes secs sans compter les multiples mentions évoquant la « grande nécessité de moudre à cause des eaux basses » ou indiquant que « les poissons mouroyent dans les rivières à cause de la sécheresse ». Ecartons cependant toute affirmation abusive en précisant bien que les sécheresses évoquées ici ne prétendent pas correspondre à une absence totale de précipitations. La sécheresse de l'historien telle qu'il la découvre dans ses archives désigne davantage un épisode très sec et long dont les impacts économiques et humains s'avèrent être d'une rare gravité [310].

Pour la France, 68 sécheresses comprises entre 1500 et 2014 ont été recensées. Elles sont très inégalement réparties chronologiquement et correspondant à des niveaux de sévérité très variables (Figure 0-7).



**Figure 0-7.** Chronologie et sévérité des sécheresses en France entre 1500 et 2014 selon l'échelle HSDS (*Historical Severity Drought Scale*). Source : E. Garnier (2017).

Ces disparités sont encore plus frappantes lorsque ces événements sont répartis sur des périodes de 50 ans. Trois grandes tendances peuvent être ébauchées depuis le XVI<sup>e</sup> siècle. La première est comprise entre 1500 et 1700 ; elle se caractérise par une fréquence soutenue de sécheresses avec en moyenne une sécheresse tous les huit ans. Une rupture nette intervient au XVIII<sup>e</sup> siècle qui connaît une hausse très importante du nombre de sécheresses. En effet, leur effectif atteint 21 événements avec un pic impressionnant enregistré dans la première moitié du siècle (14 sécheresses). Au cours de cette période, une sécheresse se produit en moyenne tous les 3,5 ans. Cette évolution est totalement inédite au cours des 500 années étudiées. Jamais, avant 1700 puis après 1800, une telle fréquence est ob-



**Figure 0-8.** Chronologie et sévérité des sécheresses en Grande-Bretagne entre 1500 et 2014 selon l'échelle HSDS (*Historical Severity Drought Scale*). Source : E. Garnier (2017).

servable. Ce chapelet d'épisodes secs est particulièrement bien documenté dans les archives et dans les mémoires de l'Académie royale des Sciences de Paris. En effet, les scientifiques de l'Observatoire de Paris furent particulièrement préoccupés par ce long épisode sec et très chaud. C'est pourquoi l'historien dispose de nombreuses données instrumentales et observations [306].

Le XIX<sup>e</sup> et le siècle suivant se caractérisent par des sécheresses plus fréquentes, bien que le petit âge glaciaire s'estompe à compter des années 1850. Néanmoins, le XX<sup>e</sup> siècle accuse une réelle recrudescence, sans qu'il soit possible d'observer un tournant à partir de 1950. Et encore, cette augmentation n'est remarquable que dans le cadre d'une comparaison sur 200 ans. Elle reste en effet très nettement inférieure à celle du XVIII<sup>e</sup> siècle.

Les archives britanniques disponibles ont permis de recenser 42 sécheresses de sévérité variable en fonction de la *Historical Severity Drought Scale* (HSDS). La chronologie ainsi reconstituée (Figure 0-9) accuse de très fortes disparités d'un siècle à l'autre en termes de fréquences et de sévérité.

En premier lieu, la répartition de ces événements extrêmes par demi-siècle révèle les grandes phases arides de l'histoire de la Grande-Bretagne depuis les années 1500. On observe une rupture assez nette entre la période antérieure à 1700 et les trois derniers siècles. La première ne connaît en effet que 11 événements alors que l'on en dénombre 31 pour les 300 dernières années. Ce faible nombre avant 1700 peut s'expliquer par deux raisons. La première résulterait des lacunes de la documentation. La seconde raison, sans doute la plus pertinente, serait liée au contexte climatique de la période. En effet, les XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles corres-

pondent en Europe à une phase très sévère du petit âge glaciaire avec des saisons beaucoup plus humides et fraîches, particulièrement entre 1540 et 1640 puis 1683-1693.

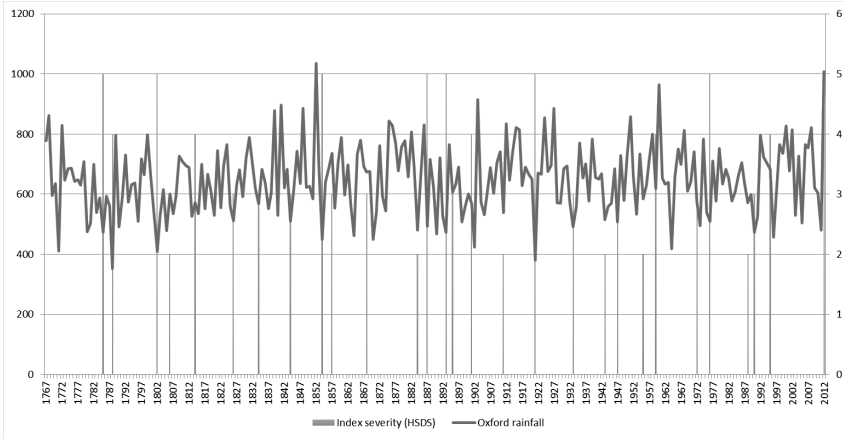
Après les années 1700, le phénomène sécheresse semble nettement plus fréquent. Le premier épisode aride correspond aux années 1700-1750 au cours desquelles le continent européen subit des conditions climatiques différentes. A compter de 1705 et jusqu'à la fin des années 1730, le climat est plus chaud et sec, même si 1709 demeure toujours aujourd'hui l'année du « grand hiver » en Europe. D'ailleurs, plusieurs sécheresses comme celles de 1714, 1715, 1740 débutent durant des hivers très froids et très secs. Le second tournant se produit après 1800 avec une fréquence accrue des sécheresses, très certainement imputable au début du réchauffement climatique naturel à partir de 1830-1850. Désormais, chaque période cinquantennale subit entre 6 et 7 événements arides sans qu'il y ait pour autant une recrudescence du phénomène depuis les années 1950.

Enfin, la saisie des données pluviométriques mensuelles d'Oxford collectées sur place depuis le XVIIIe siècle a permis de comparer cette série pluviométrique avec les sécheresses évaluées selon la HSDS. On observe de bonnes similitudes entre les événements historiques recensés dans les archives et les périodes de déficits pluviométriques. Néanmoins, les sécheresses de sévérité 5 ne correspondent pas systématiquement aux plus faibles précipitations. Ainsi les sécheresses extrêmement sévères de 1785 et de 1976 ne coïncident pas avec les niveaux de pluie les plus bas à Oxford. Ce constat peut s'expliquer par des conditions pluviométriques locales différentes du reste du pays ou bien par d'autres facteurs météorologiques – comme le vent par exemple – qui auraient aggravé la sécheresse [314].

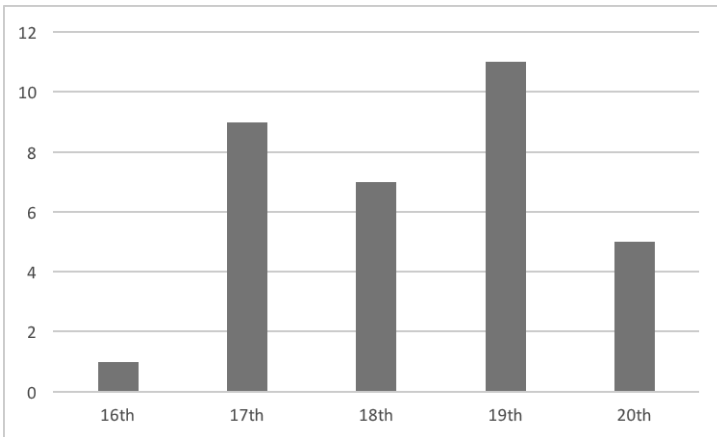
### *Les submersions marines*

Le 28 février 2010, vers 2 heures du matin, la tempête Xynthia a frappé l'arc atlantique, principalement la portion comprise entre le sud de la Bretagne et Bordeaux (cf. Figure 0-1), provoquant la majorité des pertes humaines et matérielles dans les départements de Vendée et de Charente-Maritime. Des digues, des dunes et autres ouvrages cédèrent, engendrant l'inondation de plus de 50.000 hectares et des pertes s'élevant à une cinquantaine de morts. Parmi les causes justifiant le lourd bilan humain et matériel, la non prise en compte de l'expérience historique, en particulier de la catastrophe de 1953 en Mer du Nord, a joué un rôle majeur dans l'augmentation de l'exposition des sociétés littorales.

L'approche historique bat en brèche l'idée selon laquelle la submersion de février 2010 fut un aléa difficilement prévisible. En effet, entre 1550 et 2010, 117 submersions ont été collectées dans les archives pour l'ensemble des littoraux français. Parmi elles, 30 catastrophes ont frappé exclusivement le littoral Atlan-



**Figure 0-9.** Comparaison entre les sécheresses britanniques (mesurées selon l'échelle HSDS) et les précipitations observées à Oxford (ordonnée de gauche : en mm) entre 1767 et 2012. Source : E. Garnier (2017).

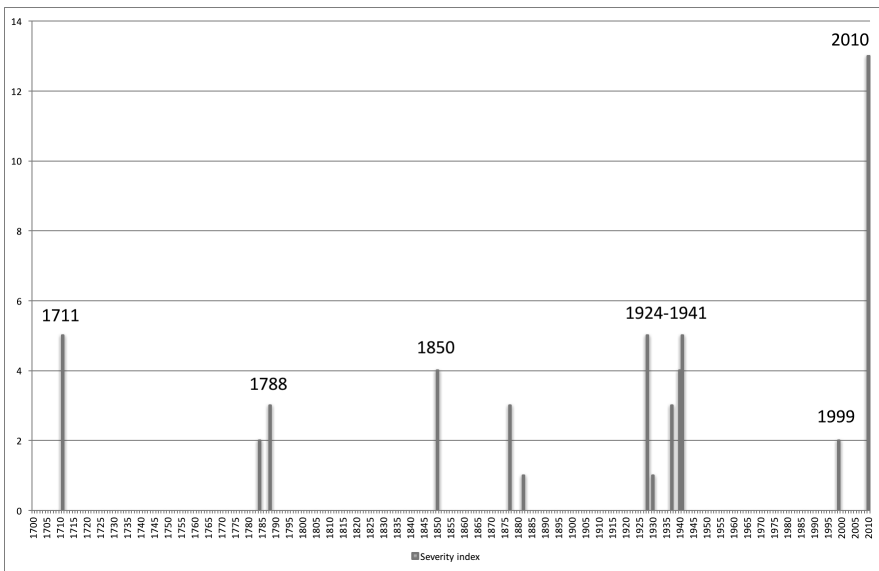


**Figure 0-10.** Distribution par siècle des ondes de tempête historiques aux alentours de Gravelines (Mer du Nord). Source : E. Garnier (2017).

tique. Plus intéressants sont les temps moyens de retour calculés à partir de ces séries. Une nouvelle fois, ils sont relativement homogènes puisqu'ils sont compris

entre 14 et 19 ans, avec un risque estimé à 15 ans sur les rivages atlantiques [316].

En se focalisant sur le seul littoral atlantique, la chronologie montre de fortes disparités depuis 500 ans. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, les 50 dernières années n'ont pas connu de recrudescence de ce type d'événements extrêmes. Le siècle le plus catastrophique correspond au XVIII<sup>e</sup> siècle avec neuf submersions alors que le XX<sup>e</sup> siècle en totalise seulement cinq (voir par exemple Figure 0-10). Il semble également que l'apogée du petit âge glaciaire au XVII<sup>e</sup> siècle se soit traduit par une moindre fréquence de ces extrêmes (3 submersions). Au cours des 100 dernières années, six submersions ont frappé les régions françaises de l'Atlantique avec une caractéristique notable néanmoins : la très grande majorité se produisit entre 1924 et 1957.



**Figure 0-11.** Les submersions de la Faute-sur-Mer entre 1700 et 2010, en termes de score d'impact. Ce score est établi à partir de la caractérisation de nombreux type de dommages, comme les inondations de bâtiments, les pertes en vies humaines, de récoltes, de bétail, les surfaces noyées, les dommages aux infrastructures et le coût financier engendré par l'événement. Source : [316].

Ville martyre de Xynthia s'il en est, La Faute-sur-Mer (cf. Figure 0-1) n'a pourtant pas découvert le danger maritime en 2010. Au moins sept submersions affectèrent la commune depuis 1711 soit un temps moyen de retour de 42 ans (Figure 0-11). Plus étonnant est le fait que la municipalité connut trois submersions dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle (1928, 1937 et 1941), une chronologie plutôt récente qui semble, une fois de plus, avoir été totalement oubliée au moment du développement touristique de la ville [315].



Le paradigme de civilisation élaboré par le philosophe Montesquieu au XVIII<sup>e</sup> siècle affirme comme postulat que plus les sociétés sont évoluées et plus elles sont capables de se mettre à l'abri des conséquences des catastrophes naturelles. Les archives exploitées dans cette contribution tendraient à prouver le contraire lorsqu'elles soulignent la capacité des sociétés pré-industrielles à conserver et à transmettre la mémoire des aléas et, au-delà, à en tirer des retours d'expérience à même d'améliorer des stratégies de résilience dont les repères visuels, les *ex-voto* et les paysages anciens plus résilients comme le bocage, le retrait de l'habitat par rapport au trait de côte, etc. sont les signes les plus emblématiques. Plus trivialement, ces exemples historiques peuvent-ils être exploités pour renforcer la capacité de nos sociétés contemporaines à absorber le choc que représente un extrême ?

Si l'expérience du passé ne doit pas être idéalisée, elle doit en revanche être observée et réemployée pour concevoir des stratégies de prévention basées sur les adaptations élaborées par nos devanciers. Pour eux, en effet, le risque n'était pas une fatalité mais plutôt un état d'attente débouchant sur l'anticipation d'une crise éventuelle. Ils veillaient donc à entretenir le souvenir des catastrophes passées et à se préparer à la menace permanente. Les communautés, entre les temps médiévaux et la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, ont justement su développer des systèmes d'alerte-prévention souples et efficaces permettant aux populations de se réfugier, soit à l'étage de leurs maisons, soit dans des zones réputées, de mémoire d'homme, insubmersibles dans le cas des inondations. Malheureusement, cet enseignement a été perdu en raison de la rupture mémorielle, démographique (exode rural, attraction balnéaire) et technique postérieure à la seconde guerre mondiale. Certes empiriques, ces dispositions des anciens illustrent une mémoire de la conservation fondée sur la capacité d'un groupe à acquérir et à développer, à travers l'histoire, le souvenir de son propre héritage en matière de survie.

*Besançon, le 9 juillet 2017,*

**Emmanuel Garnier**

*Directeur de Recherche CNRS, Université de Besançon  
Membre Senior Honoraire de l'Institut Universitaire de France (2010-2015)  
Visiting Professor and French Government Overseas Fellow  
(Cambridge University, Churchill College, RU ; 2012-2013))  
Visiting Professor à l'Université de Genève (2014)*

**Nicolas Bousquet** est chercheur expert, professeur associé à Sorbonne Université ;

**Pietro Bernardara** est chercheur expert, directeur du CERE. Ils se sont entourés d'une dizaine de spécialistes pour la rédaction de cet ouvrage.

*Avant que survienne un événement naturel extrême (crues, pluie diluvienne, tempête, tremblement de terre...), il est essentiel de pouvoir disposer de méthodes et d'outils permettant de réduire le risque d'exposition des populations, des ouvrages de génie civil et des installations industrielles, en particulier lorsque celles-ci agissent en interaction avec l'environnement. La théorie statistique des valeurs extrêmes constitue l'un des ingrédients majeurs des outils de mesure et d'aide à la mitigation des risques. L'appréhension moderne de ces risques extrêmes nécessite de nombreuses extensions de la théorie de base. En effet, un besoin accru de précision – quel risque peut caractériser une zone non instrumentée, ou possédant un faible historique ? – une injonction à considérer des cumuls d'aléas plutôt qu'un aléa unique, ainsi que la prise en compte de tendances climatiques non-stationnaires caractérisent ces études modernes. La fusion d'informations hétérogènes, spatiales et temporelles, et la recherche de données extrêmes dans des bases de plus en plus massives deviennent indispensables. Mais l'emploi de ces outils, au contact des applications, ne peut également se passer d'analyse critique et de conseils de praticiens.*

Cet ouvrage présente l'ensemble de cette méthodologie, de façon transverse à différentes spécialités scientifiques telles que l'hydrologie, l'océanographie, la climatologie ou la météorologie. Partant de la caractérisation probabiliste des événements extrêmes naturels, celle-ci mène à la quantification d'indicateurs aussi importants que les niveaux de retour, les fréquences de dépassements conjoints de seuils extrêmes ou les tests de tendances, en permanence nourrie par des exemples traités par les chercheurs d'EDF. Les grands théorèmes fondateurs de modélisation probabiliste et d'estimation statistique, les mécanismes d'analyse spatiale et temporelle, l'étude des structures de corrélation dans les extrêmes et les plus récents résultats de modélisation statistique bayésienne sont décrits et leur application est discutée en détail. Accessible à l'étudiant, au professeur, à l'ingénieur, au chercheur, cet ouvrage s'adresse également aux actuaires et aux compagnies d'assurance et de réassurance.